

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Edivan Laercio Carvalho

**CONCEPÇÃO E ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO  
DE POTÊNCIA APLICADAS AO CONTROLE DE NANORREDES C.C.  
COM BARRAMENTOS INTERCONECTADOS**

Santa Maria – BR

2021



**Edivan Laercio Carvalho**

**CONCEPÇÃO E ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO  
DE POTÊNCIA APLICADAS AO CONTROLE DE NANORREDES C.C.  
COM BARRAMENTOS INTERCONECTADOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Michels

Santa Maria – BR

2021

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

Carvalho, Edivan Laercio

Concepção e análise de estratégias de gerenciamento de potência aplicadas ao controle de nanorredes c.c. com barramentos interconectados / Edivan Laercio Carvalho.- 2021.

147 f.; 30 cm

Orientador: Leandro Michels

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2021

1. nanorredes 2. controle de geração de energia 3. conversores de interconexão 4. gerenciamento de energia em edificações 5. instalações elétricas prosumidoras I. Michels, Leandro II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.


Declaro, EDIVAN LAERCIO CARVALHO, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Edivan Laercio Carvalho**

**CONCEPÇÃO E ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO  
DE POTÊNCIA APLICADAS AO CONTROLE DE NANORREDES C.C.  
COM BARRAMENTOS INTERCONECTADOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Elétrica**.

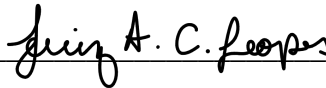
**Aprovado em 13 de dezembro de 2021**



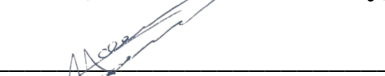
**Leandro Michels, Dr. (UFSM) – Videoconferência**  
(Presidente/Orientador)



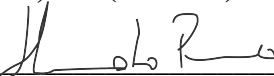
**Cassiano Rech, Dr. (UFSM) – Videoconferência**



**Luiz Antônio Correa Lopes, PhD. (Concordia University) – Videoconferência**



**Marcello Mezaroba, Dr. (UDESC) – Videoconferência**



**Humberto Pinheiro, PhD. (UFSM) – Videoconferência**

Santa Maria – BR

2021



## **DEDICATÓRIA**

Com todo amor e carinho à minha mãe, Alzira Elena Carvalho.





## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à minha mãe, Alzira Elena Carvalho, por toda sua dedicação à educação de seus filhos, por todo seu amor e pela confiança depositada em mim. Obrigado por todas as suas orações neste longo período que estou longe de casa. Também gostaria de ressaltar toda a sua dedicação ao ensino. Com certeza seu exemplo é um dos principais motivos da realização desta tese de doutorado, que sei, foi um de nossos sonhos compartilhados.

Agradeço ao meu orientador, professor Leandro Michels, por acreditar neste trabalho, pelas orientações e por sempre apoiar minhas decisões. Agradeço por todas as oportunidades que me deu, e principalmente por permitir que este trabalho fosse possível.

Agradeço em especial ao meu orientador e amigo, professor Rafael Cardoso, que sempre foi um dos meus grandes incentivadores. Guardo com muito carinho todos os seus ensinamentos, desde os tempos de graduação.

Não poderia deixar de agradecer aos professores Lucas Vizzotto Bellinaso e Rafael Cardoso, pelas contribuições que deram ao trabalho. Foram incontáveis as nossas conversas e discussões durante todo o período de doutorado, e tenho certeza que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Cassiano Rech, Luiz Antônio Correa Lopes, Marcello Mezaroba e professor Humberto Pinheiro. Agradeço pelas importantes contribuições que deram com a revisão da tese.

Agradeço a todos os colegas do GEPOC e POLITEC por todas as nossas conversas, pela amizade e pelo companheirismo durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Maria, assim como à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pelo ensino de excelência e por todo suporte que foi necessário para execução desta tese de doutorado.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro (processos 427987/2018-0 e 303997/2019-2). Gostaria de agradecer também ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída em Energia Elétrica (INCT-GD) pelo suporte financeiro, através das agências financiadoras CNPq (processo 465640 / 2014-1), CAPES (processo 23038.000776 / 2017-54) e FAPERGS (7/2551-0000517-1). O presente trabalho também foi realizado com apoio do Programa Nacional de Cooperação Acadêmica da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES/Brasil.



"Venham a mim todos que estão cansados e  
sobrecarregados, e eu lhes darei descanso"

(Mateus, 11:28)



## RESUMO

### CONCEPÇÃO E ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA APLICADAS AO CONTROLE DE NANORREDES C.C. COM BARRAMENTOS INTERCONECTADOS

AUTOR: Edivan Laercio Carvalho

ORIENTADOR: Professor Dr. Leandro Michels

Esta tese propõe a concepção e análise de estratégias de gerenciamento de potência aplicadas ao controle de nanorredes c.c. com múltiplos barramentos. Nanorredes são consideradas instalações elétricas prosumidoras, residenciais e comerciais de pequeno porte que, tipicamente, envolvem sistemas de geração fotovoltaica, armazenamento de energia, e cargas críticas em extra-baixa tensão. Neste trabalho é proposta uma nova estratégia de gerenciamento de potência baseada em teoria preços e malhas de controle por decaimento (*droop*). A estratégia de preços é utilizada como uma metodologia simples para definir modos de operação aos elementos de potência. Isso permite melhorar a eficiência do gerenciador, porque não é necessário que os elementos atuem em modo compartilhamento de potência durante todo o tempo. O gerenciamento é implementado de maneira distribuída para o controle de sistemas interconectados. Para validar a proposta, o gerenciamento baseado em preços foi avaliado para uma nanorrede formada por barramento c.c. de baixa tensão, em 380 V, interconectado através de um conversor *interlink* a um ou mais barramentos de extra baixa tensão, em 48 V. Esses níveis de tensão estão de acordo com padrões industriais e regulamentações para distribuição de energia c.c., cuja normatização encontra-se em fase de desenvolvimento junto à IEC. O barramento de 380 V é empregado para a conexão do sistema com a rede elétrica c.a., sistemas fotovoltaicos, e outras cargas de potência elevada. Neste sistema, o barramento de 48 V é empregado para alimentar cargas leves, mas que comumente apresentam maior prioridade devido à natureza de sua aplicação, tais como equipamentos eletrônicos, centrais de processamento de dados, iluminação de segurança, entre outros. A principal contribuição do trabalho é a concepção de uma ferramenta simples que facilite ao usuário final realizar o gerenciamento de potência da nanorrede, incluindo a priorização de cargas, armazenamento de energia, e variações tarifárias do sistema público de distribuição. Resultados de simulação e experimentais são apresentados para validar os conceitos propostos.

**Palavras-chave:** controle de geração de energia; conversores de interconexão; gerenciamento de energia em edificações; nanorredes; instalações elétricas prosumidoras.



## ABSTRACT

### CONCEPTION AND ANALYSIS OF POWER MANAGEMENT STRATEGIES APPLIED TO CONTROL INTERCONNECTED DC BUSES NANOGRIDS

AUTHOR: Edivan Laercio Carvalho  
ADVISOR: Professor Dr. Leandro Michels

This thesis proposes the conception and analysis of power management strategies applied to the control of multiple buses dc nanogrids. Nanogrids are small-scale commercial and residential prosumer electrical installations that, typically, involves photovoltaic generation systems, energy storage, and critical loads at extra-low voltage levels. In this work, a new power management strategy is proposed, based on a price response theory and droop control loops. The pricing strategy is used as a simple methodology to define operation modes for each power element. This allows improving the efficiency of the power management, because is not necessary a power-sharing mode all the time. The power management is implemented in a distributed way to control interconnected systems. To validate this proposal, the price-based power management was applied in a dc nanogrid that includes a low voltage dc bus, at 380 V, interconnected through an interlink converter to one or more extra-low voltage buses, at 48 V. These voltage levels are in accordance with industry standards and regulations for dc power distribution, whose standardization is under development with the IEC. The 380 V bus is used to connect the system to ac grid, photovoltaic systems, and other high-power loads. In this system, the 48 V bus is used to supply light loads, but which commonly have higher priority due to the nature of their application, such as electronic devices, data centers, emergency lights and others. The main contribution of the work was the conception of a simple tool that makes it easier for the end-user to carry out the power management of the nanogrid, such as load prioritization, energy storage, and tariff variations of the distribution system. Simulation and experimental results are presented to validate the proposed concepts.

**Key-words:** power generation control; dc-dc power converters; building management systems; power distribution systems; smart power grids.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Microrrede com nanorredes interconectadas e geração distribuída. ....	30
Figura 1.2 – Nanorrede interconectada com barramentos c.c. e conexão com rede elétrica....	31
Figura 1.3 – Princípios de segurança e normatização para sistemas LVDC. ....	32
Figura 1.4 – Padronização de cargas em instalações em LVDC. ....	33
Figura 1.5 – Resposta transitória dos controladores <i>droop</i> para dois elementos, considerando: (a) coeficientes de decaimento $m_1=m_2$ ; (b) coeficientes $m_1\neq m_2$ . ....	35
Figura 1.6 – Gerenciamento de potência centralizado, baseado em sinalização de tensão no barramento c.c. e matrizes de resposta ao preço. ....	37
Figura 1.7 – Proposta de gerenciamento de potência baseado em preço, para o controle de nanorredes c.c. com barramentos interconectados. ....	41
Figura 2.1 – Estrutura de gerenciamento de energia elétrica para nanorredes. ....	46
Figura 2.2 – Estrutura de controle centralizada para nanorredes c.c. ....	48
Figura 2.3 – Estrutura de controle descentralizada para nanorredes c.c. ....	49
Figura 2.4 – Estrutura de controle centralizada/descentralizada para o gerenciamento de nanorredes. ....	51
Figura 2.5 – Diagrama de conversores c.c.-c.c. em paralelo com controladores <i>droop</i> . ....	53
Figura 2.6 – Curvas de controladores <i>droop</i> com diferentes ganhos de decaimento, considerando $m_1>m_2$ . ....	53
Figura 2.7 – Resposta transitória dos controladores <i>droop</i> para dois elementos, considerando: (a) coeficientes de decaimento $m_1=m_2$ ; (b) coeficientes $m_1\neq m_2$ . ....	54
Figura 2.8 – Controle <i>droop</i> hierárquico para redução dos desvios de tensão no barramento. ....	55
Figura 2.9 – Resposta transitória do controle <i>droop</i> hierárquico para redução do desvio de tensão no barramento c.c.: (a) redução do desvio de tensão com a malha de controle externa; (b) controle <i>droop</i> convencional. ....	56
Figura 2.10 – Curvas dos controladores <i>droop</i> associadas a sinalização do barramento c.c.: a) conversores para o processamento de energia FV; b) sistemas de armazenamento de energia; c) inversores de tensão (c.c.-c.a.) ....	57
Figura 2.11 – Exemplo de mudanças de estados de operação em estratégias de gerenciamento de potência baseado em sinalização do barramento c.c. e máquinas de estados. ....	58
Figura 2.12 – Estrutura de controle descentralizada com sinalização do barramento c.c. ( <i>DBS</i> ). ....	59
Figura 2.13 – Formação de preço em função da sinalização de tensão do barramento c.c. ....	62
Figura 2.14 – Estrutura de controle centralizada, considerando matrizes de resposta ao preço (MRPs) e sinalização do barramento c.c. ....	64
Figura 3.1 – Organização hierárquica do gerenciamento de potência baseado em resposta ao preço. ....	69
Figura 3.2 – Evolução de preços na nanorrede considerando o índice de escassez e variações de tensão no barramento c.c.: (a) variação do índice de escassez; (b) variação de preços. ....	71

Figura 3.3 – Sistema de controle de tensão do barramento c.c. para determinação as tensões de comparação: (a) circuito de potência; (b) circuito equivalente para modelagem do barramento c.c.; (c) diagrama de controle. ....	73
Figura 3.4 – Resultados de simulação para a resposta transitória de controle do barramento c.c. (a) elevação de tensão por desconexão de carga; (b) afundamento de tensão por conexão de carga.....	74
Figura 3.5 – Resultados de simulação para a inicialização do sistema: (a) inicialização do sistema para o teste de sobre-elevação; (b) inicialização do sistema para o teste de variação negativa de tensão. ....	76
Figura 3.6 – Diagrama geral da nanorrede e gerenciamento de potência baseado preços.....	78
Figura 3.7 – Gráfico de preços máximos e mínimos de compra e venda de energia, parametrizados pelo usuário. ....	83
Figura 3.8 – Preenchimento das MRPs para os principais elementos da nanorrede.....	86
Figura 3.9 – Malhas de regulação de tensão para implementação dos modos -1 e 1.....	90
Figura 3.10 – Resultado de simulação para os controladores <i>droop</i> convencionais, considerando o ensaio de variação de cargas.....	92
Figura 3.11 – Resultado de simulação para o controle <i>droop</i> hierárquico, considerando para reduzir os desvios de tensão no barramento c.c.....	93
Figura 3.12 – Estrutura de gerenciamento de potência distribuído, para sistemas interconectados. ....	95
Figura 3.13 – Curvas teóricas de inicialização da nanorrede, considerando o método de gerenciamento de potência com MRPs.....	96
Figura 3.14 – Curvas teóricas de inicialização da nanorrede considerando barramentos interconectados. ....	97
Figura 3.15 – Lógica de parametrização dos diferentes elementos de potência da nanorrede.	99
Figura 4.1 – Diagrama de potência da nanorrede c.c. e gerenciamento de potência. ....	105
Figura 4.2 – Diagrama dos conversores de potência da nanorrede c.c. em LVDC e variáveis medidas. ....	106
Figura 4.3 – Resultados de simulação para a inicialização do sistema: tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ); corrente do conversor c.c.-c.a. ( $i_{ca}$ ); tensão da rede c.a. ( $v_{ca}$ ); preço interno ( $P_s$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-LV}$ ); corrente das baterias ( $i_{bat-LV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-LV}$ ). ....	110
Figura 4.4 – Resultados de simulação para a conexão de carga à nanorrede: tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ); corrente do conversor c.c.-c.a. ( $i_{ca}$ ); tensão da rede c.a. ( $v_{ca}$ ); preço interno ( $P_s$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-LV}$ ); corrente das baterias ( $i_{bat-LV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-LV}$ ). ....	112
Figura 4.5 – Resultados de simulação para a conexão de uma nova fonte à nanorrede: tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ); corrente do conversor c.c.-c.a. ( $i_{ca}$ ); tensão da rede c.a. ( $v_{ca}$ ); preço interno ( $P_s$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-LV}$ ); corrente das baterias ( $i_{bat-LV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-LV}$ ). ....	114
Figura 4.6 – Resultado experimental para a inicialização do sistema com alta disponibilidade de energia: tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ); corrente do inversor ( $i_{ca}$ ); tensão da	

	rede c.a. ( $v_{ca}$ ); preço interno ( $P_s$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-LV}$ ); corrente do banco de baterias ( $i_{bat-LV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-LV}$ ).....	116
Figura 4.7 – Resultados experimentais para a mudança de tarifa barata para intermediária:	tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ); corrente do inversor ( $i_{ca}$ ); tensão da rede c.a. ( $v_{ca}$ ); preço interno ( $P_s$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-LV}$ ); corrente do banco de baterias ( $i_{bat-LV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-LV}$ ).....	117
Figura 4.8 – Resultados experimentais para a mudança de tarifa intermediária para cara:	tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ); corrente do inversor ( $i_{ca}$ ); tensão da rede c.a. ( $v_{ca}$ ); preço interno ( $P_s$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-LV}$ ); corrente do banco de baterias ( $i_{bat-LV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-LV}$ ).....	118
Figura 4.9 – Resultados para a redução do estado de carga das baterias:	tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ); corrente do inversor ( $i_{ca}$ ); tensão da rede c.a. ( $v_{ca}$ ); preço interno ( $P_s$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-LV}$ ); corrente do banco de baterias ( $i_{bat-LV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-LV}$ ).....	119
Figura 4.10 – Resultados experimentais de recarga do banco de baterias:	tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ); corrente do inversor ( $i_{ca}$ ); tensão da rede c.a. ( $v_{ca}$ ); preço interno ( $P_s$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-LV}$ ); corrente do banco de baterias ( $i_{bat-LV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-LV}$ ).....	121
Figura 4.11 – Diagrama de potência da nanorrede c.c. em ELVDC. ....		122
Figura 4.12 – Resultado experimentais para a inicialização do sistema em ELVDC, considerando baixa energia disponível na nanorrede:	tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-ELV}$ ) em 48 V; corrente do conversor <i>interlink</i> ( $i_{int.}$ ); preço interno ( $P_s$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-ELV}$ ); corrente do banco de baterias ( $i_{bat-ELV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-ELV}$ ).....	125
Figura 4.13 – Resultados experimentais do distúrbio de potência em LVDC, causado pela inicialização do barramento auxiliar em ELVDC:	tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ); corrente do inversor ( $i_{ca}$ ); tensão da rede c.a. ( $v_{ca}$ ); preço interno ( $P_s$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-LV}$ ); corrente do banco de baterias ( $i_{bat-LV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-LV}$ ).....	126
Figura 4.14 – Resultado experimentais para a carga completa do banco de baterias em ELVDC:	tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-ELV}$ ) em 48 V; corrente do conversor <i>interlink</i> ( $i_{int.}$ ); preço interno ( $P_s$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-ELV}$ ); corrente do banco de baterias ( $i_{bat-ELV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-ELV}$ ).....	127



## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_b$	Capacitor de barramento em extra-baixa tensão
$C_B$	Capacitor de barramento em baixa tensão
$C_i$	Controlador de corrente
$C_v$	Controlador de tensão
$d$	Perturbação sobre a razão cíclica (ação de controle)
$D$	Razão cíclica
$\delta_P$	Variação de preços
$e$	Índice de escassez
$\Delta v$	Desvio de tensão em determinado barramento c.c.
$\Delta e$	Variação do índice de escassez
$i_{Bat}$	Corrente de baterias
$i_{ca}$	Corrente do conversor de tensão c.c.-c.a.
$i_{int}$	Corrente do conversor <i>interlink</i>
$i_{fv}$	Corrente de geração fotovoltaica
$i_{max-n}$	Corrente máxima processada pelo conversor de índice $n$
$n$	Índice de amostra
$v_{ca}$	Tensão da rede c.a.
$v_{Bat}$	Tensão de um banco baterias
$v_{cc}$	Tensão c.c. de barramento
$v_{fv}$	Tensão de geração fotovoltaica
$v_o$	Tensão de saída dos conversores c.c.
$v_{Gsx}$	Tensão de acionamento dos interruptores
$v_s$	Tensão limite de comparação superior
$v_i$	Tensão limite de comparação inferior
<b>pvec</b>	Vetor de preços
$P_\$$	Preço interno sinalização por determinado barramento c.c.



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<i>DBS</i>	Sinalização do barramento c.c. ( <i>dc bus signaling</i> )
<i>ELV</i>	Extra-Baixa Tensão ( <i>Extra-Low Voltage</i> )
<i>ELVDC</i>	Extra-baixa tensão c.c. ( <i>Extra-Low Voltage dc</i> )
<i>FLL</i>	<i>Frequency locked loop</i>
<i>HVDC</i>	Alta tensão c.c. ( <i>High Voltage dc</i> )
<i>LV</i>	Baixa Tensão ( <i>Low Voltage</i> )
<i>LVDC</i>	Baixa tensão c.c. ( <i>Low Voltage dc</i> )
<i>MVDC</i>	Média tensão c.c. ( <i>Medium Voltage dc</i> )
<i>MRPs</i>	Matrizes de resposta ao preço
<i>OCs</i>	Condições de operação de determinado elemento
<i>PELV</i>	Sistema de Extra-Baixa Tensão Protegido ( <i>Protected Extra-Low Voltage</i> )
<i>SoC</i>	Estado de carga ( <i>State of Charge</i> )
<i>SPMP</i>	Seguimento do Ponto de Máxima Potência
<i>SPLP</i>	Seguimento do Ponto de Limitação de Potência
<i>UPS</i>	Fonte de Alimentação Ininterrupta ( <i>Uninterrupted Power Supply</i> )





## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>29</b>
1.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....	34
1.2	OBJETIVOS .....	39
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>40</b>
1.3	CONTRIBUIÇÕES DA TESE .....	40
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	42
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>45</b>
2.1	ESTRUTURAS DE CONTROLE PARA NANORREDES .....	45
<b>2.1.1</b>	<b>Gerenciamento de potência centralizado.....</b>	<b>47</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Controladores descentralizados .....</b>	<b>48</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Controladores centralizados/descentralizados.....</b>	<b>50</b>
2.2	CONTROLADORES <i>DROOP</i> .....	51
2.3	CONTROLE DROOP HIERÁRQUICO .....	55
2.4	CONTROLE DROOP ADAPTATIVO.....	56
2.5	SINALIZAÇÃO DE TENSÃO DO BARRAMENTO C.C. ....	58
2.6	MÁQUINAS DE ESTADOS .....	60
2.7	MATRIZES DE RESPOSTA AO PREÇO .....	62
2.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	65
<b>3</b>	<b>GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA BASEADO EM RESPOSTA AO PREÇO .....</b>	<b>67</b>
3.1	INTRODUÇÃO AO GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA BASEADO EM PREÇOS .....	67
3.2	METODOLOGIA DE CÁLCULO DOS PREÇOS .....	69
<b>3.2.1</b>	<b>Determinação das tensões de comparação para sinalização dos barramentos .....</b>	<b>71</b>
3.2.1.1	<i>Resposta do barramento c.c. para distúrbios de carga.....</i>	72
3.2.1.2	<i>Resposta do barramento c.c. para a inicialização do sistema .....</i>	75
3.2.1.3	<i>Escolha das tensões de comparação .....</i>	75
<b>3.2.2</b>	<b>Síntese do método de cálculo de preços .....</b>	<b>76</b>
3.3	PROPOSTA DA ESTRATÉGIA DE GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA.....	78
<b>3.3.1</b>	<b>Classificação dos elementos da nanorrede e modos de operação .....</b>	<b>79</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Matrizes de resposta ao preço (MRPs) .....</b>	<b>81</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Metodologia de cálculo das MRPs.....</b>	<b>82</b>
3.3.3.1	<i>Parametrização de preços.....</i>	83
3.3.3.2	<i>Definição das dimensões das matrizes de resposta ao preço.....</i>	84
3.3.3.3	<i>Preços de compra/venda e atribuição aos modos de operação .....</i>	85

<b>3.3.4</b>	<b>Síntese do método de cálculo das MRPs .....</b>	<b>85</b>
3.3.4.1	<i>MRPs para cargas passivas.....</i>	86
3.3.4.2	<i>MRPs para fontes unidirecionais.....</i>	87
3.3.4.3	<i>MRPs para elementos bidirecionais .....</i>	88
3.4	<b>ESCOLHA DAS MALHAS DE REGULAÇÃO DE TENSÃO .....</b>	<b>90</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Avaliação dos controladores <i>droop</i> para conversores em paralelo.....</b>	<b>90</b>
3.4.1.1	<i>Resultados de simulação com controle <i>droop</i> .....</i>	91
3.5	<b>ESTRUTURA DO GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA PARA BARRAMENTOS INTERCONECTADOS .....</b>	<b>94</b>
<b>3.5.1</b>	<b>Gerenciamento baseado em resposta ao preço .....</b>	<b>95</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Considerações em relação a teoria de preços e projeto das MRPs para os conversores <i>interlink</i> .....</b>	<b>98</b>
3.6	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....</b>	<b>100</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E ENSAIOS EXPERIMENTAIS DA ESTRATÉGIA PROPOSTA PARA NANORREDES COM MULTIPLOS BARRAMENTOS C.C.....</b>	<b>102</b>
4.1	<b>CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROJETO .....</b>	<b>102</b>
4.2	<b>DESCRIÇÃO DA NANORREDE ANALISADA .....</b>	<b>103</b>
4.3	<b>GERENCIAMENTO DO SISTEMA EM LVDC.....</b>	<b>106</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Resultados de simulação em tempo real para o sistema em LVDC .....</b>	<b>109</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Resultados experimentais para o gerenciamento de potência em LVDC .....</b>	<b>115</b>
4.3.2.1	<i>Ensaio 1: Inicialização do sistema com alta disponibilidade de energia.....</i>	115
4.3.2.2	<i>Ensaio 2: mudança de tarifa da rede elétrica de barata para intermediária.....</i>	116
4.3.2.3	<i>Ensaio 3: mudança de tarifa da rede elétrica de intermediária para cara.....</i>	118
4.3.2.4	<i>Ensaio 4: redução do estado de carga das baterias.....</i>	119
4.3.2.5	<i>Ensaio 5: recarga do banco de baterias.....</i>	120
4.4	<b>GERENCIAMENTO DO SISTEMA EM ELVDC .....</b>	<b>121</b>
<b>4.4.1</b>	<b>Resultados experimentais para o gerenciamento de potência do barramento auxiliar em ELVDC .....</b>	<b>124</b>
4.4.1.1	<i>Ensaio 1: Inicialização do sistema com baixa disponibilidade de energia.....</i>	124
4.4.1.2	<i>Ensaio 2: Carga completa do banco de baterias.....</i>	127
4.5	<b>CONSIDERAÇÕES EM RELAÇÃO AS DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA .....</b>	<b>128</b>
4.6	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>132</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>134</b>
5.1	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>135</b>
	<b>PUBLICAÇÕES RELACIONADAS A TESE .....</b>	<b>138</b>

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>140</b>
<b>APÊNDICE A: ESPECIFICAÇÕES DA NANORREDE EM LVDC.....</b>	<b>146</b>
<b>APÊNDICE B: ESPECIFICAÇÕES DA NANORREDE EM ELVDC .....</b>	<b>147</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia, e impactos ambientais têm motivado o uso de fontes renováveis, em diferentes escalas e aplicações. Esta atenção se estende principalmente à energia solar fotovoltaica, devido a segurança operacional e viabilidade econômica em diferentes escalas. Este tipo de geração tem sido aplicado para atender ao aumento de demanda de forma local e descentralizada em relação as grandes centrais de geração (TEODORESCU *et al.*, 2011), (DRAGICEVIC *et al.*, 2016b), (AGÜERO; KHODAEI, 2018). Considerando as vantagens da geração distribuída quanto a proximidade às cargas, microrredes surgiram como uma solução promissora para os problemas de geração/distribuição, porque possibilitam a formação de um sistema local de energia em níveis de tensão de distribuição (LASSETER, 2001), (GUERRERO *et al.*, 2013a), (GUERRERO *et al.*, 2013b), (OLIVARES *et al.*, 2014), (HENDERSON, NOVOSEL, CROW, 2017), (HUANG *et al.*, 2021), (LI, CHAN, HU, GUERRERO, 2021).

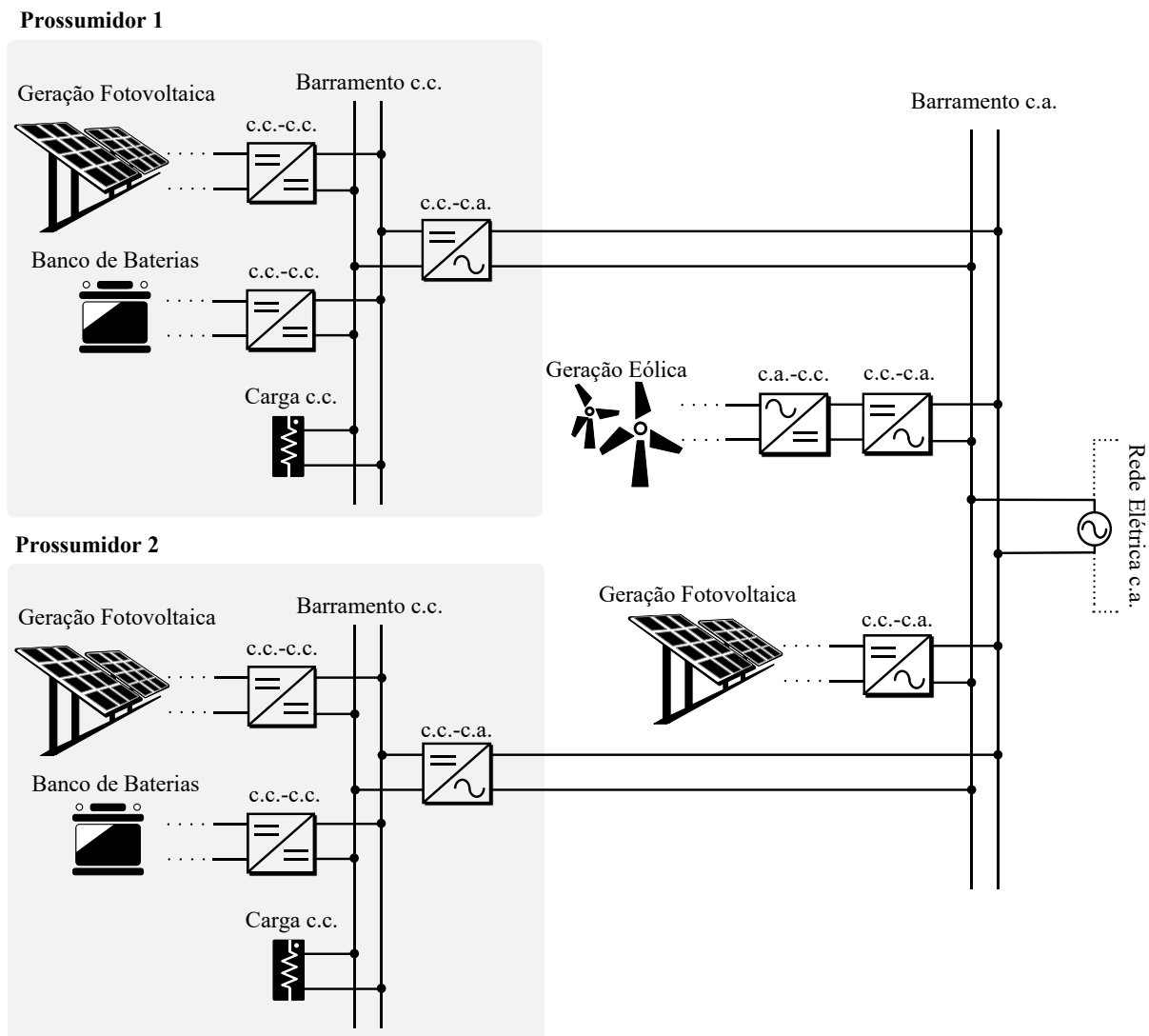
Em relação a escalabilidade, microrredes podem ser organizadas em pequenas instalações para o controle local de unidades prossumidoras. Uma abordagem possível para o controle de geração distribuída em pequena escala, em um único edifício ou instalação concentrada, são as nanorredes (NORDMAN, CHRISTENSEN, 2015), (BURMESTER *et al.*, 2017). Nanorredes podem ser consideradas como subsistemas de uma microrrede, ou mesmo uma microrrede em pequena escala, porque são restritas em relação a níveis de potência, aplicações e locais de instalação (PARHIZI *et al.*, 2015), (WERTH *et al.*, 2015), (UNAMUNO, BARRENA, 2015), (LIU; CALDOGNETTO; BUSO, 2019).

Apesar de que uma definição detalhada do termo nanorrede ainda ser discutida na literatura, Nordman *et al.* (2015) e Burmester *et al.* (2017) apresentam uma separação simples, porém, efetiva para os termos nanorredes e microrredes: enquanto microrredes abrangem várias instalações elétricas ou edificações, nanorredes são definidas como um único domínio de tensão, tarifação e controle. Isso significa que, enquanto microrredes são desenvolvidas, principalmente, para a interação com o sistema público de distribuição, nanorredes estão relacionadas a propriedade individual do cliente (WERTH *et al.*, 2015), (BURMESTER *et al.*, 2017), (HENDERSON, NOVOSEL, CROW, 2017).

Apesar de que uma interface com a rede pública ainda é necessária, devido a questões de controle e suporte de potência, esta separação comumente relaciona as nanorredes ao conceito de edifícios autossuficientes em energia, ou edifícios com energia líquida zero (*Net-Zero Energy Buildings*). Por outro lado, as microrredes estão relacionadas principalmente com a organização do sistema de potência (BURMESTER *et al.*, 2017), (CHOI *et al.*, 2018),

(WANG; LAM; WONG, 2019), (HU *et al.*, 2021). Portanto, microrredes abrangem várias instalações, como bairros residenciais, prédios, instalações industriais e outros, enquanto nanorredes pertencem a uma única unidade prosumidora, ou edificação/instalação em baixa tensão e baixa potência. Um exemplo simples da aplicação de nanorredes é ilustrado na Figura 1.1, onde uma microrrede é dividida em nanorredes interconectadas e geração distribuída.

Figura 1.1 – Microrrede com nanorredes interconectadas e geração distribuída.



Fonte: adaptado de Burmester (2017).

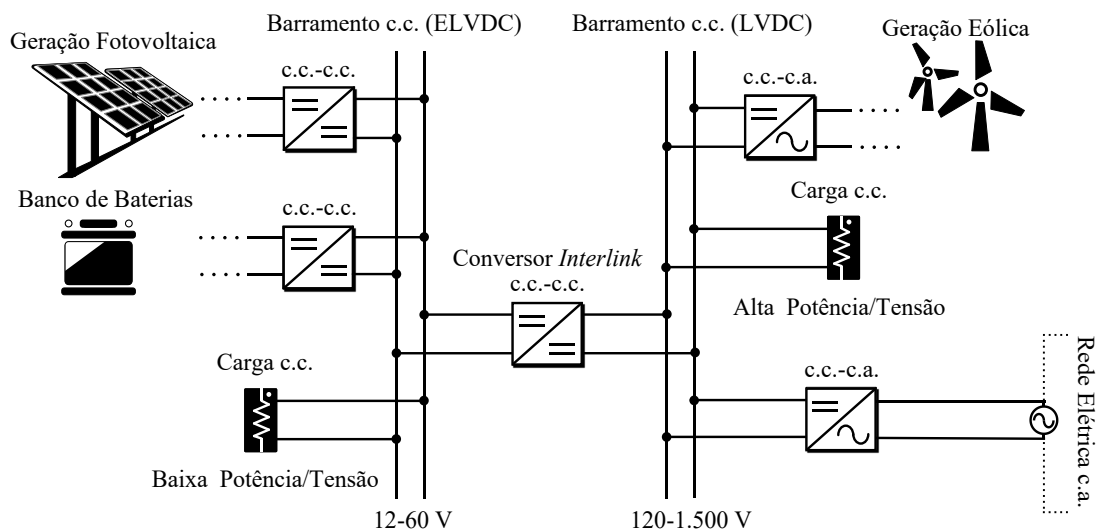
Nesta concepção de sistema, a implementação de nanorredes, como subsistemas de uma rede ou microrrede, permite reduzir problemas de controle e gerenciamento de potência a soluções locais e descentralizadas, visto que cada nanorrede apresenta seu próprio sistema de

controle e gerenciamento de potência (UNAMUNO, BARRENA, 2015), (BURMESTER *et al.*, 2017), (PAPARI *et al.*, 2019).

Para a implementação de nanorredes, existem diferentes abordagens de interconexões de fontes, incluindo barramento c.c. centralizado, barramento c.a. e múltiplos barramentos, que incluem o caso de nanorredes híbridas (c.c.-c.a.) e nanorredes com mais de um barramento c.c. (GUERRERO *et al.*, 2013b), (BOROYEVICH *et al.*, 2013), (KUMAR; ZARE; GHOSH, 2017), (PAPARI *et al.*, 2019), (LIU; CALDOGNETTO; BUSO, 2019), (HUANG *et al.*, 2021). A possibilidade de operar com energia c.c., c.a. ou de forma híbrida é uma questão ampla, entretanto, para o contexto de nanorredes a literatura atual é claramente favorável a abordagens c.c., e sistemas com múltiplos barramentos, devido à alta inserção de cargas em extra-baixa tensão em aplicações residenciais e comerciais de pequeno porte (AILEE, TSCHUDI, 2012), (KUMAR *et al.*, 2017), (LOTFI, KHODAEI, 2017), (LI *et al.*, 2018), (PAPARI *et al.*, 2019).

Uma nanorrede com múltiplos barramentos c.c. é apresentada na Figura 1.2, onde um conversor de interconexão, ou conversor *interlink* é utilizado para a interface de barramentos com diferentes níveis de tensão. Do ponto de vista de redes de distribuição, estes barramentos são escolhidos em valores classificados como baixa tensão (*low voltage* – LVDC) para instalações entre 120 V e 1,5 kV, e extra-baixa tensão (*extra-low voltage* – ELVDC) para valores inferiores a 60 V, ou 120 V em sistemas a três fios (IEC, 2010), (CARVALHO *et al.*, 2019).

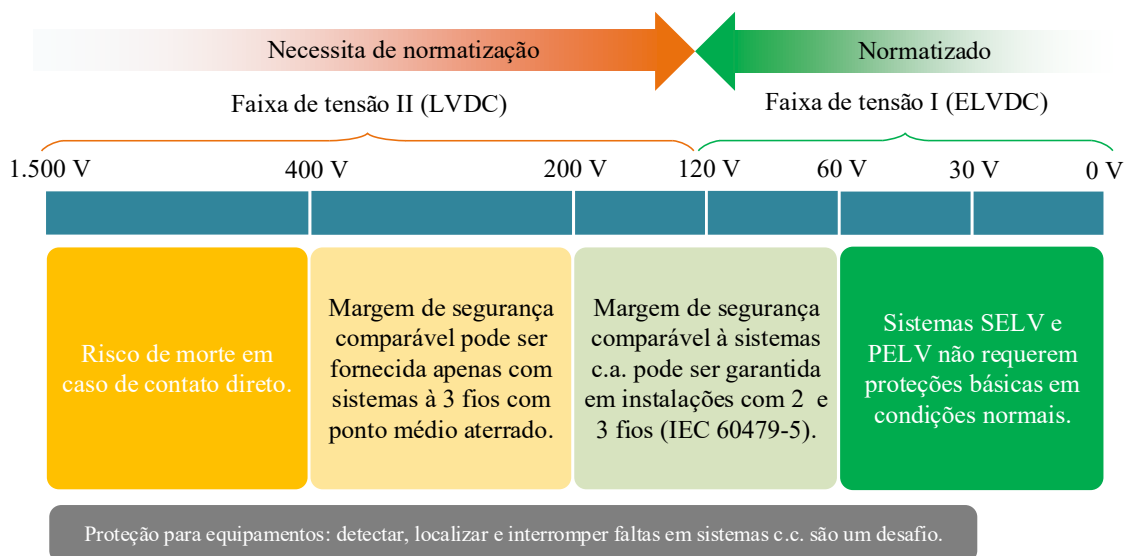
Figura 1.2 – Nanorrede interconectada com barramentos c.c. e conexão com rede elétrica.



Fonte: adaptado de Carvalho *et al.* (2019).

O interesse em nanorredes com múltiplos barramentos é motivado pela alta inserção de equipamentos eletrônicos baseados em extra-baixa tensão (ELVDC) em aplicações residenciais e comerciais. Isso ocorre porque níveis de tensão em ELVDC são necessários para atender padrões de segurança contra choques elétricos, sem a necessidade de dispositivos de segurança adicionais, como disjuntores de corrente residual c.c. e dispositivos de supervisão de isolamento (ABNT NBR 5410, 2008). De maneira complementar, uma interface com a rede elétrica c.a. é interessante, porque permite garantir suporte às nanorredes, a partir do sistema público de distribuição, que idealmente é uma fonte com alta disponibilidade de potência (LIU; CALDOGNETTO; BUSO, 2019), (VUYYURU; MAITI; CHAKRABOTY, 2019), (PAPARI *et al.*, 2019). O relatório técnico IEC (2017) indica padrões de segurança para sistemas em LVDC a partir da normatização existente para instalações em corrente contínua. O resultado é ilustrado na Figura 1.3, que apresenta margens de segurança para sistemas c.c. comparáveis as de sistemas c.a. em até 200 V.

Figura 1.3 – Princípios de segurança e normatização para sistemas LVDC.



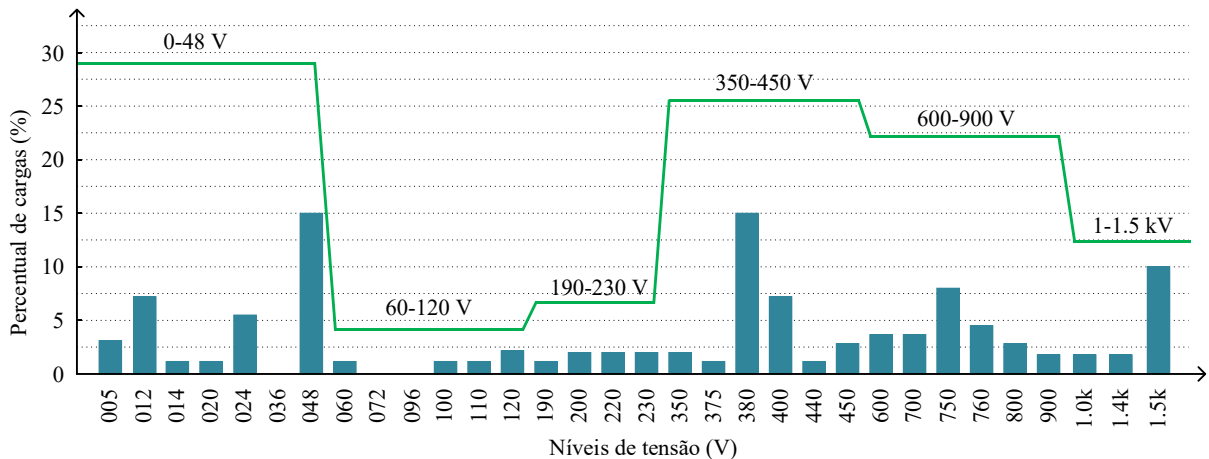
Fonte: IEC (2017).

Em relação a padronização de cargas, um levantamento realizado pela IEC (2017) e apresentado na Figura 1.4 indica que a maior parte das cargas com padrões em LVDC encontram-se em uma faixa de 0-48 V para sistemas em extra-baixa tensão e de 350-450 V para sistemas em baixa tensão. Neste contexto de aplicação, nanorredes c.c. e com múltiplos barramentos apresentam uma série de vantagens em relação a abordagens c.a., uma vez que: *i*) equipamentos eletrônicos utilizam energia c.c. e, portanto, demandam conversores c.a.-c.c.



quando conectados à rede pública de distribuição (c.a.); e *ii*) no segmento industrial um número significativo de inversores de frequência é utilizado, demandando etapas de conversão c.a. para c.c. e posteriormente c.c. para c.a. (KUMAR; ZARE; GHOSH, 2017).

Figura 1.4 – Padronização de cargas em instalações em LVDC.



Fonte: IEC (2017).

Em relação as estratégias de controle para o gerenciamento de potência, diferentes trabalhos têm proposto máquinas de estados (SCHONBERGER *et al.*, 2006), (BELLINASO *et al.*, 2016), (BELLINASO *et al.*, 2021), controladores *droop* (BUERGUER *et al.*, 2019), (NGUYEN *et al.*, 2019) e controladores *droop* adaptativos (MOKHTAR, MAREI, EL-SATTAR, 2019), (LEE, KIM, KIM, MOON, 2020), (BHOSALE, GUPTA, AGARWAL, 2021) (HUANG *et al.*, 2021), (LI, CHAN, HU, GUERRERO, 2021) para o controle de nanorredes. Estas estratégias podem ser divididas em controladores centralizados e descentralizados, de acordo com a organização do sistema de controle (GUERRERO *et al.*, 2013a), (LAI *et al.*, 2019), (WU *et al.*, 2020).

Em controladores centralizados um *link* de comunicação com alta largura de banda é necessário para informar modos de operação, ou referências de potência para cada elemento da nanorrede (BURMESTER *et al.*, 2017), (KUMAR; ZARE; GHOSH, 2017), (LAI *et al.*, 2019), (WU *et al.*, 2020). Essa abordagem é comumente associada a máquinas de estados e sistemas de controle supervisórios (LIU *et al.*, 2011), (BELLINASO *et al.*, 2016), (BELLINASO *et al.*, 2021), (GHASAEI *et al.*, 2021).

Em abordagens de controle descentralizadas, uma estratégia de compartilhamento de potência é necessária, porque os diferentes elementos não se comunicam entre si (HAN *et al.*, 2017), (TAYAB *et al.*, 2017). A estratégia de compartilhamento de potência mais comum na

literatura são os controladores *droop*. Neste caso, todos os elementos de potência devem contribuir para a regulação de tensão no barramento c.c. e estabilidade da rede (GUERRERO *et al.*, 2011), (GUERRERO *et al.*, 2013a), (DRAGICEVIC *et al.*, 2016a).

## 1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

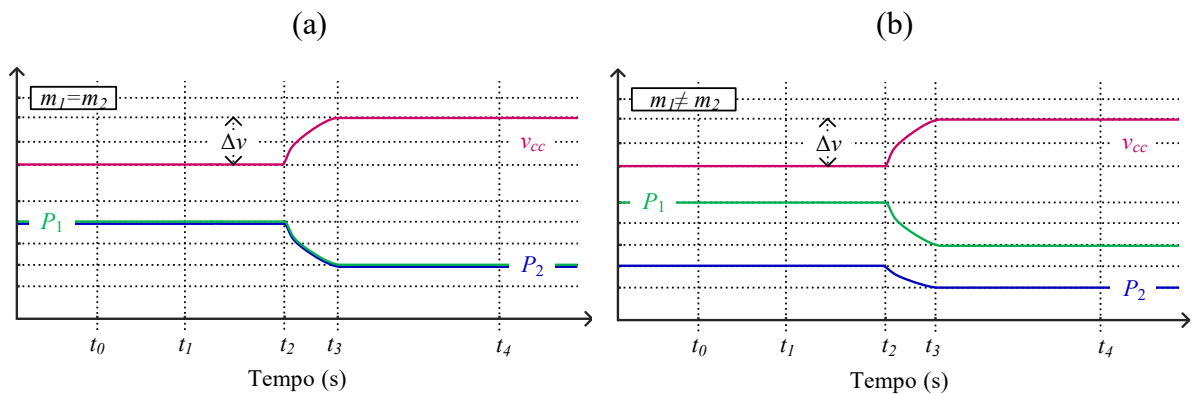
No contexto de aplicação de nanorredes e edifícios autossuficientes em energia, normas técnicas relacionadas a sistemas de distribuição em corrente contínua, tais como as da série IEC 60364, preveem um sistema de gerenciamento para a operação inteligente de unidades prossumidoras. Na IEC 60364-8, o controle da nanorrede é dividido em diferentes camadas, que podem ser resumidas em: *i*) controladores primários, relacionados as funcionalidades dos conversores de interface, como algoritmos de seguimento do ponto de máxima potência (SPMP), sincronização com a rede c.a., e malhas de regulação de tensão e corrente; *ii*) gerenciamento de potência, responsável pelo equilíbrio de potência entre geração, armazenamento e cargas; e *iii*) gerenciamento de energia, relacionado a otimização de custos e eficiência a longo prazo. O principal objetivo desta tese é o desenvolvimento das estratégias de gerenciamento de potência, porque esta camada é responsável pela estabilidade da nanorrede, do ponto de vista de balanceamento de potência.

Um dos problemas que surgem no contexto de nanorredes é a questão da efetividade do gerenciamento, porque devido à natureza da aplicação, é necessário prever a priorização de cargas e fontes, e garantir alta confiabilidade para o fornecimento de energia e alta regulação de tensão no barramento c.c. (KUMAR *et al.*, 2017). Isso acontece porque cargas em extra-baixa tensão, apresentam elevado nível de prioridade devido à natureza crítica de suas aplicações. Em instalações industriais por exemplo, fontes dedicadas para extra-baixa tensão são desenvolvidas para atender cargas como computadores, centrais de processamento de dados, sistemas de *backup*, entre outros.

Esta característica impede a utilização de algumas técnicas de controle já estabelecidas, como os controladores *droop*. A nível primário malhas de controle *droop* são caracterizadas por coeficientes, ou ganhos de decaimento ( $m$ ). Os ganhos de decaimento ( $m$ ) são responsáveis pelo compartilhamento de potência entre geradores distribuídos (DRAGICEVIC *et al.*, 2016a), (MENG *et al.*, 2017), (BURMESTER *et al.*, 2017), (CARVALHO *et al.*, 2021a). A Figura 1.5 mostra um exemplo de resposta transitória, considerando dois conversores iguais operando com controle *droop*. Primeiro, quando o coeficiente de decaimento é igual, ambos os

conversores processam o mesmo nível de potência [Figura 1.5 (a)]. Entretanto, quando  $m_1 \neq m_2$ , o compartilhamento de potência é proporcional ao coeficiente de decaimento de cada conversor [Figura 1.5 (b)]. Além disso, é notado na Figura 1.5 o desvio de tensão ( $\Delta v$ ) inerente das malhas de compartilhamento de potência.

Figura 1.5 – Resposta transitória dos controladores *droop* para dois elementos, considerando: (a) coeficientes de decaimento  $m_1 = m_2$ ; (b) coeficientes  $m_1 \neq m_2$ .



Fonte: autoria própria.

Além do erro de tensão, quando são considerados coeficientes de decaimento fixos e não há *links* de comunicação, os controladores *droop* têm uma importante desvantagem. Esta desvantagem refere-se ao fato de que todos os elementos de potência devem contribuir para o controle de tensão do barramento c.c. (GUERRERO *et al.*, 2011), (GUERRERO *et al.*, 2013a), (DRAGICEVIC *et al.*, 2016a). Isso significa que mesmo com energia excedente, fontes com alto custo de produção, como geradores a diesel e baterias de baixo estado de carga, estarão em operação, não sendo totalmente desligados (TAYAB *et al.*, 2017), (CARVALHO *et al.*, 2021a).

Inicialmente, isto não foi considerado um problema, porque os controladores *droop* foram originalmente propostos para caracterizar o compartilhamento de potência entre geradores iguais, que apresentam o mesmo nível de prioridade, e mesmas condições nominais de operação (KIM, CHOI, CHO, 2002). Por outro lado, este aspecto de controle torna-se inadequado para o gerenciamento de nanorredes visto que estas envolvem fontes e cargas com diferentes prioridades e especificações de potência. Por exemplo, geradores a diesel, naturalmente apresentam alto custo de produção, porque são baseados em uma fonte de geração externa e não renovável. Por outro lado, geradores renováveis apresentam custo marginal de produção nulo e natureza não despachável. O resultado é que não é possível operar em um ponto ótimo, ou nominal, quando utilizados controladores *droop* convencionais.

Posteriormente, muitos trabalhos foram propostos para caracterizar tais variações de potência e prioridades das fontes de geração e cargas. O cálculo adaptativo dos ganhos de decaimento é uma extensão dos controladores *droop* convencionais – que não consideram mudanças de condições de operação. Em função de coeficientes variáveis, controladores *droop* adaptativos foram propostos inicialmente em Kim *et al.* (2002) para equilibrar o estado de carga de baterias e evitar sobrecargas, ou descargas profundas. Métodos semelhantes foram utilizados em Dragicevic *et al.* (2014), e posteriormente em Mokhtar *et al.* (2019), Lee *et al.* (2020), Huang *et al.* (2021) e Li *et al.* (2021).

Mesmo melhorando o compartilhamento de potência para fontes de potência variável, em controladores *droop* adaptativos, todos os elementos permanecem em modo compartilhamento de potência durante toda a operação da nanorrede. No contexto de nanoredes e edifícios autossuficientes em energia, esse conceito ainda é inadequado porque não permite prever, com exatidão, quando um elemento de potência deve ser ligado ou desligado, em função das condições de operação (CARVALHO *et al.*, 2021a).

Em Schonberger *et al.*, (2006b) e Sun *et al.* (2011), controladores *droop* foram associados com máquinas de estados e sinalização de tensão do barramento c.c. (DBS). Neste caso, os coeficientes de decaimento são adaptados em função das variações de tensão do barramento. Adicionalmente, elementos de potência podem ser ligados ou desligados em função do estado de operação da nanorrede. O problema é que esta abordagem apresenta maior desvio de tensão. Além disso, Schonberger *et al.* (2006b) e Sun *et al.* (2011) ainda apresentam pouca efetividade em relação ao gerenciamento, porque os controladores *droop* foram utilizados a nível secundário, associados a um modelo de gerenciamento pré-definido (MOKHTAR, MAREI, EL-SATTAR, 2019), (LEE, KIM, KIM, MOON, 2020), (BHOSALE, GUPTA, AGARWAL, 2021) (HUANG *et al.*, 2021), (LI, CHAN, HU, GUERRERO, 2021).

Em Dragicevic *et al.* (2016a) uma malha externa de controle é proposta para reduzir os desvios de tensão no barramento c.c., inerentes dos controladores *droop*. Neste caso uma estrutura de comunicação é necessária, mesmo que com baixa largura de banda. Esta malha de controle também é utilizada em Buerguer *et al.* (2019) e é comumente denominada de controle *droop* hierárquico. Nguyen (2019), além de reduzir o erro de tensão, utiliza junto ao controle hierárquico, um fator de ponderação para ajustar o compartilhamento de potência em função da sinalização do barramento c.c. (DBS).

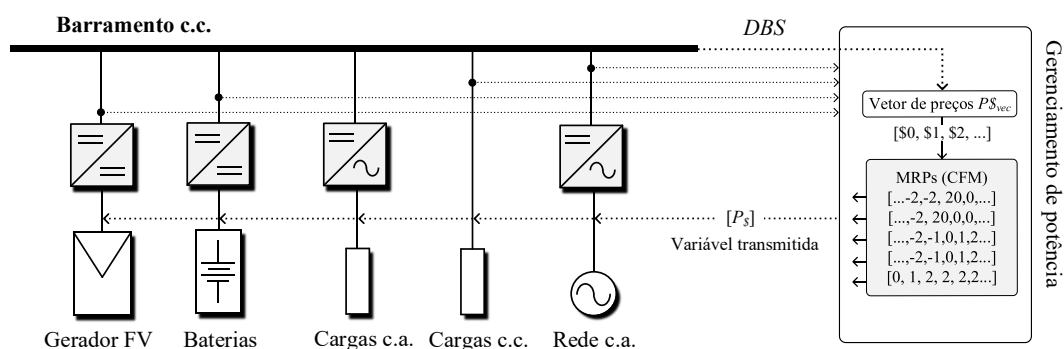
Em abordagens de controle centralizadas, é possível garantir melhor regulação de tensão porque um único elemento controlador é definido para o controle do barramento c.c. (BELLINASO *et al.*, 2021). Isso permite melhorar a resposta de controle quando, por exemplo,

cargas são conectadas diretamente ao barramento (KUMAR; ZARE; GHOSH, 2017), (GHASAEI *et al.*, 2021).

Um ponto negativo de controladores centralizados é que comumente são implementados na forma de máquinas de estados. Em nanoredes, o problema de gerenciamento de potência é extenso, porque muitos geradores distribuídos podem ser considerados. Além da coordenação de geração, pode haver diferentes prioridades de cargas, como por exemplo: equipamentos médicos (alta prioridade), iluminação (prioridade média) e equipamentos eletrônicos de uso geral (baixa prioridade) (KUMAR; ZARE; GHOSH, 2017). O resultado é que, em máquinas de estados, o algoritmo de controle é complexo e demanda um grande esforço de programação (GUERRERO *et al.*, 2013a), (GUO *et al.*, 2017), (LI *et al.*, 2018a).

Em Bellinaso (2017), uma máquina de estados centralizada é proposta para modelar o gerenciamento de potência de maneira simplificada. Essa metodologia é denominada matrizes de resposta ao preço (MRPs) e relaciona as máquinas de estados a teoria de preços. Nas MRPs os estados de operação são predefinidos para que cada elemento atue de maneira autônoma, comprando ou vendendo energia (BELLINASSO, 2017). Por exemplo, uma fonte pode atuar vendendo energia em resposta ao preço, ou mesmo desligada quando esta transação não apresenta vantagens para a operação do sistema. A estrutura de controle proposta em Bellinaso (2017) é ilustrada na Figura 1.6.

Figura 1.6 – Gerenciamento de potência centralizado, baseado em sinalização de tensão no barramento c.c. e matrizes de resposta ao preço.



Fonte: autoria própria.

Nesta proposta é verificado que os níveis de tensão do barramento c.c. são inversamente proporcionais à escassez de energia na rede. Isso significa que a alta escassez de energia resulta em afundamentos transitórios de tensão, enquanto elevações de tensão significam excesso de energia. Em Bellinaso (2017) a variável preço é apenas um sinal de controle relacionado a

sinalização de tensão do barramento c.c. (*DBS*) (BELLINASO, 2017), (BELLINASO *et al.*, 2021), (CARVALHO *et al.*, 2021a), (CARVALHO *et al.*, 2021b).

A principal desvantagem das matrizes de resposta ao preço é que se tratando de uma estratégia de controle centralizada, o gerenciamento de potência depende de um sistema de medição de tensão rápido e preciso. Portanto, o controle da nanorrede é sensível a falhas de comunicação, erros de medida, e quedas de tensão, o que não ocorre em controladores *droop* (TAYAB *et al.*, 2017), (BELLINASO *et al.*, 2021), (CARVALHO *et al.*, 2021a). Adicionalmente, a ideia de matrizes de resposta ao preço é fundamentada em dois aspectos:

- i.* **Em relação a estrutura da nanorrede:** é considerado que todas as trocas de potência ocorrem por meio do barramento c.c. centralizado. Isso significa que todos os elementos de potência são conectados a um único barramento. Portanto, a proposta inicial das MRPs não foi aplicada a sistemas com múltiplos barramentos, porque depende de uma estrutura de comunicação.
- ii.* **Em relação ao controle de tensão:** um único elemento de potência deve ser definido como controlador de tensão para cada condição de operação. Isso significa que nenhuma estratégia de compartilhamento de potência é utilizada, principalmente devido aos erros de tensão resultantes dos controladores *droop*.

Em Bellinaso (2017), nenhuma estratégia de compartilhamento de potência é prevista para que dois ou mais elementos controlem a tensão do barramento ao mesmo tempo. Os erros ocasionados por controladores *droop* a nível primário não permitem calcular o preço de maneira adequada, porque essa estimativa depende da sinalização de tensão. O resultado é que se perde flexibilidade para o dimensionamento do gerenciador, uma vez que um único elemento deve atuar como controlador de tensão. Isso significa que para o dimensionamento das matrizes de resposta ao preço, todo o conjunto de MRPs deve ser avaliado (BELLINASO *et al.*, 2021), (CARVALHO *et al.*, 2021a).

Na Tabela 1.1 são resumidas as características potenciais das estratégias de controle/gerenciamento de potência para nanorredes, com o objetivo de contextualizar a estratégia proposta, frente a literatura atual.

Enquanto controladores *droop* naturalmente apresentam robustez e funcionalidade *plug-and-play*, controladores centralizados são pouco flexíveis e dependentes do bom funcionamento da estrutura de comunicação (TAYAB *et al.*, 2017), (NGUYEN *et al.*, 2020), (BHOSALE, GUPTA, AGARWAL, 2021), (GHASAEI *et al.*, 2021), (HUANG *et al.*, 2021), (LI, CHAN, HU, GUERRERO, 2021). Por outro lado, através de máquinas de estados, é possível definir com exatidão o ponto de operação de cada elemento de potência. Portanto, nas MRPS o fluxo

de potência é ajustável em função da programação do gerenciador, enquanto em controladores descentralizados os elementos de potência atuam fora do ponto nominal de operação, devido a malha de compartilhamento de potência. Isso indica que ainda é necessário desenvolver um método abrangente para as questões de gerenciamento de potência, porque o método precisa abordar vários aspectos, incluindo a natureza distribuída do problema e características próprias de cada elemento, como prioridades e variações de condições de operação.

Tabela 1.1 – Resumo das principais características de soluções para o gerenciamento de nanorredes.

	Gerenciamento baseado em <i>droop</i>	Gerenciamento centralizado e MRPs
Controle de tensão	Regulação indireta (compartilhamento de potência)	Controle direto de tensão (automação por estados de operação)
Controle de potência	Não-ajustável	Ajustável em função da programação
Adição de novos elementos	Reequilíbrio automático ( <i>plug-and-play</i> )	Reequilíbrio por programação
Soluções atuais	<i>Droop</i> adaptativos: ponto não-ótimo	Matrizes de resposta ao preço
<b>Proposta:</b> MRPs a nível secundário e controladores <i>droop</i> hierárquicos a nível primário		

Como proposta de contribuição ao controle e gerenciamento de potência de nanorredes, nesta tese, controladores *droop* hierárquicos são utilizados a nível primário. Para o gerenciamento efetivo da nanorrede são utilizadas matrizes de resposta ao preço. Ao associar controladores *droop* a teoria de resposta ao preço, diferentes características positivas são aproveitadas de ambas as soluções, incluindo: *i*) funcionalidade *plug-and-play*; *ii*) priorização de cargas e geração; *iii*) maior liberdade para otimização do sistema devido ao conceito de preços, prioridades e ganhos de decaimento (*m*); e *iv*) implementação do sistema de forma distribuída.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é desenvolver uma estrutura de gerenciamento de potência baseada em preços, para o controle de nanorredes c.c. com múltiplos barramentos. No sistema proposto são utilizados 48 V para o barramento auxiliar de extra-baixa e 380 V para o barramento principal em baixa tensão. Estes valores foram escolhidos devido aos padrões comerciais de cargas e por estarem de acordo com as regulamentações para distribuição de

energia c.c. em desenvolvimento junto à IEC. Para aumentar a flexibilidade de controle, a estrutura de gerenciamento da nanorrede foi dividida em níveis hierárquicos, incluindo controladores *droop* à nível primário, e matrizes de resposta ao preço à nível secundário, para o gerenciamento de potência efetivo da nanorrede. Para a conclusão do trabalho, as etapas de pesquisa, projeto e implementação foram divididas de acordo com os objetivos específicos listados na sequência.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Construção de uma nanorrede c.c. com barramentos interconectados.
- Propor uma estratégia de gerenciamento distribuída para o controle de nanorredes com múltiplos barramentos, baseada em matrizes de resposta ao preço e controladores *droop* hierárquicos.
- Comparar a estratégia proposta com controladores baseados nas técnicas *droop* à nível secundário em sistemas de gerenciamento de potência para nanorredes.
- Analisar o desempenho da estratégia proposta em uma nanorrede c.c. com múltiplos barramentos interconectados baseados nas tensões c.c. consideradas no desenvolvimento normativo atual;

## 1.3 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

No contexto de aplicação de nanorredes e instalações autossuficientes em energia, a principal contribuição da tese é a extensão do conceito das matrizes de resposta ao preço proposta em (BELLINASO, 2017), para aplicação em sistemas interconectados e com malhas de controle para compartilhamento de potência de forma distribuída, destacando-se as seguintes propostas:

- i) Uma estratégia para formação de diferentes preços para sistemas com múltiplos barramentos c.c. conectados através de conversores *interlink*;
- ii) A associação de matrizes de resposta ao preço com controladores *droop* hierárquicos para operação em modo de compartilhamento de potência.

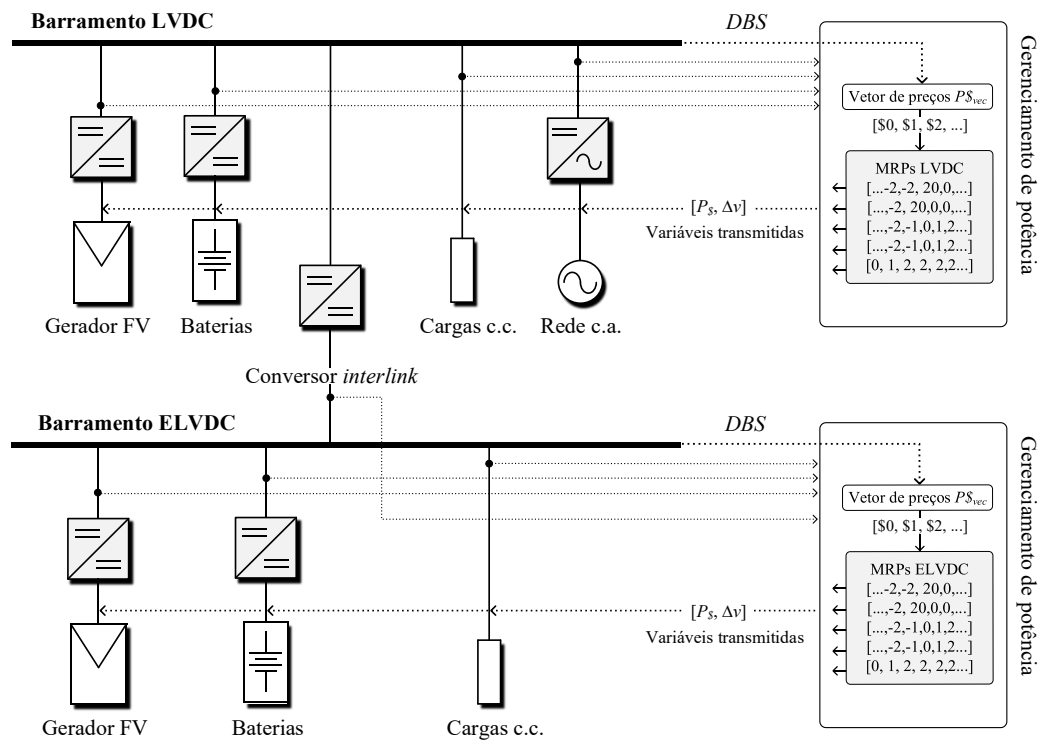
A primeira contribuição considera a formação e sinalização independentemente de preços em cada um dos barramentos c.c. empregados na nanorrede, assim como ilustrado na



Figura 1.7. Utilizando uma estratégia distribuída centralizada/descentralizada é possível incluir no gerenciamento, barramentos auxiliares em extra-baixa tensão, sem *links* de comunicação entre barramentos para o controle secundário. Isso não é possível em máquinas de estados convencionais, porque o sistema de controle se torna complexo e extenso.

Para avaliar a proposta da tese e a metodologia de dimensionamento do gerenciador de potência, uma nanorrede c.c. com dois barramentos (48 V / 380 V) é avaliada experimentalmente. Conforme a Figura 1.7, os resultados experimentais incluem geradores fotovoltaicos, bancos de baterias, conversor *interlink* (c.c.-c.c.), inversor de tensão (c.c.-c.a.) e cargas gerenciáveis.

Figura 1.7 – Proposta de gerenciamento de potência baseado em preço, para o controle de nanorredes c.c. com barramentos interconectados.



Fonte: autoria própria.

A segunda contribuição do trabalho é unir os conceitos de MRPs e de controladores *droop* hierárquicos para possibilitar que mais um elemento possa regular o barramento c.c., de forma compartilhada, em cada modo de operação, mas não exigindo que todos os elementos compartilhem potência simultaneamente. Essa proposta traz vantagens com relação à solução original de matrizes de resposta ao preço (BELLINASO, 2017), onde um único elemento deve regular o barramento c.c. para cada faixa de preço. Neste caso o gerenciador deve ser totalmente

reprojetado à medida que novos elementos sejam adicionados ao sistema (BELLINASO *et al.*, 2021), (CARVALHO *et al.*, 2021a). Por outro lado, a atual proposta também traz vantagens em relação aos controladores *droop* hierárquicos, onde todos os elementos devem compartilhar potência durante a operação da nanorrede, mesmo quando o sistema possui potência excedente e é economicamente vantajoso desligar os elementos com custo de operação mais alto.

Com base nestas contribuições, tem-se como principal resultado a união de características vantajosas das matrizes de resposta ao preço (BELLINASO, 2017) e dos controladores *droop* (DRAGICEVIC *et al.*, 2016a), (NGUYEN *et al.*, 2020), ainda que o sistema não seja implementado de maneira totalmente descentralizada. Como resultado, é possível dimensionar matrizes de resposta ao preço, individualmente, para cada elemento de potência. Isso aumenta consideravelmente a flexibilidade para se adicionar novos elementos ao sistema. Para corroborar as propostas de contribuição, simulações com *hardware-in-the-loop* e resultados experimentais foram utilizados para comparar diferentes estratégias de gerenciamento de potência, incluindo controladores *droop* convencionais, controladores *droop* hierárquicos, máquinas de estados e matrizes de resposta ao preço (MRPs).

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

De acordo com os objetivos e contribuições mencionados, o conteúdo desta tese está dividido em quatro capítulos principais e conclusões.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica incluindo as principais estruturas de controle e estratégias de compartilhamento de potência. O objetivo é definir critérios de projeto para a implementação do gerenciamento, e analisar as principais abordagens de controle aplicado a nanoredes.

O Capítulo 3 apresenta a descrição da estratégia de gerenciamento de potência. Neste capítulo, é apresentada a teoria de preços e metodologia para o dimensionamento do gerenciador. Inclui o cálculo de preços, a escolha das malhas de compartilhamento de potência, e como resultado são apresentados algoritmos que sintetizam o dimensionamento das MRPs.

O Capítulo 4 apresenta a descrição da nanorrede analisada no trabalho, bem como os resultados de simulação e experimentais empregados para validação da proposta. Os resultados são utilizados como critério de comparação entre diferentes estratégias de gerenciamento de potência.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões da tese, considerando os resultados experimentais, e comparações com estratégias de gerenciamento de potência comuns na literatura. Adicionalmente, são discutidas as perspectivas para trabalhos futuros.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são contextualizadas as partes fundamentais do trabalho, incluindo as estruturas de controle e estratégias de compartilhamento de potência. Em relação aos controladores são apresentados controladores centralizados e descentralizados. É necessário observar que o foco do trabalho está relacionado a instalações elétricas de baixa tensão e baixa potência. Portanto, sistemas de maior potência e controladores a nível de gerenciamento de energia não são abordados porque estão fora do escopo da tese.

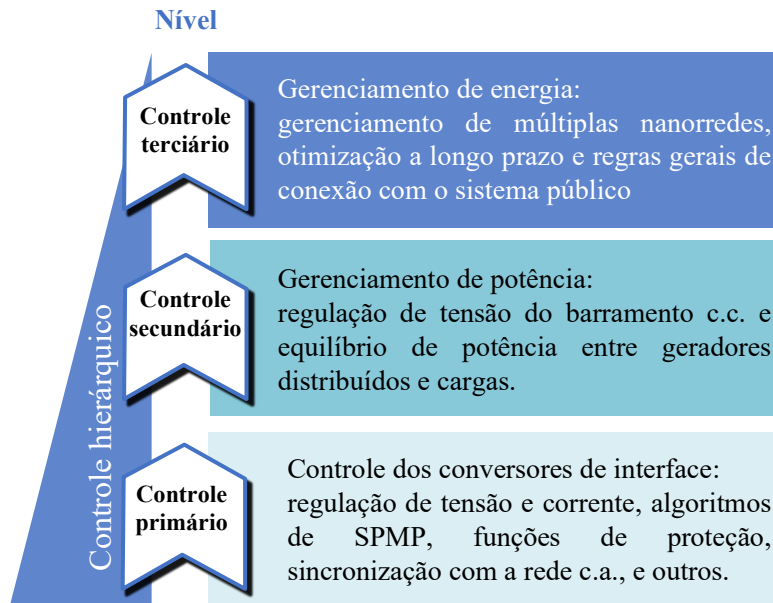
### 2.1 ESTRUTURAS DE CONTROLE PARA NANORREDES

Com relação aos aspectos de controle, é fato que em microrredes e nanorredes encontra-se uma aplicação em larga escala de conversores de potência. Portanto, a priorização de cargas e gerenciamento de potência é uma tarefa compartilhada e deve ser realizada de maneira coordenada (MENG *et al.*, 2017), (YUE *et al.*, 2018). Em Guerrero *et al.* (2011) esta coordenação é dividida em uma estrutura de controle hierárquica em três níveis: *i*) nível de **controle primário** relacionado a operação dos conversores de interface; *ii*) nível **secundário** responsável pelo gerenciamento/compartilhamento de potência; e *iii*) **terciário**, conexo as regras gerais do sistema, como o gerenciamento de energia e distribuição. Um exemplo desta organização de controle é ilustrado na Figura 2.1.

As estruturas de controle primário dizem respeito as possíveis configurações dos conversores (c.c.-c.a. e c.c.-c.c.) e suas malhas de controle. Como por exemplo, para a interface com a rede c.a., os controladores primários incluem as estruturas de sincronismo com a rede e malhas de controle de tensão e corrente. Para a geração fotovoltaica, são inclusos os conversores c.c.-c.c. e algoritmos de seguimento do ponto de máxima potência (SPMP) (BURMESTER *et al.*, 2017), (BELLINASO *et al.*, 2021).

No contexto de sistemas supervisórios e de controle a nível superior, onde incluem-se os controladores secundários e terciários, os objetivos de controle são diferentes em relação a operação do sistema ao longo do tempo. Enquanto o gerenciamento de potência é necessário para o equilíbrio de potência e estabilidade instantânea da nanorrede, o gerenciamento de energia é necessário para a otimização de variáveis como custo e eficiência a longo prazo (GUERRERO *et al.*, 2011), (UNAMUNO, BARRENA, 2015).

Figura 2.1 – Estrutura de gerenciamento de energia elétrica para nanorredes.



Fonte: adaptado de Unamuno e Brenna (2015).

Em relação as estruturas de controle, o gerenciamento de potência e de energia é dividido em estruturas de controle centralizadas e descentralizadas (BURMESTER *et al.*, 2017), (KUMAR *et al.*, 2017). Em abordagens centralizadas, uma central de controle é responsável por enviar os sinais de referência para os controladores locais a nível primário. Isso permite obter melhor resposta transitória dos controladores. Entretanto, é necessária uma estrutura de comunicação com maior largura de banda. Isso é comum para aplicações de maior potência, onde os custos de implementação e complexidade não são fatores preponderantes (THALE; WANDHARE; AGARWAL, 2015), (LIU; WANG; LIU, 2015), (BRANDÃO *et al.*, 2018), (BURMESTER *et al.*, 2017).

Em abordagens descentralizadas os controladores locais não se comunicam entre si. Neste caso, é necessária uma estratégia de compartilhamento de potência que garanta a estabilidade da nanorrede (GUERRERO *et al.*, 2013a), (LI *et al.*, 2016), (NASIRIAN *et al.*, 2016), (MENG *et al.*, 2017), (BAGHAE; MIRSALEM; GHAREHPETIAN, 2018). Para nanorredes com controle descentralizado, estratégias baseadas em controladores *droop* são as mais citadas, incluindo controladores *droop* adaptativo (AUGUSTINE *et al.*, 2015), (HUANG *et al.*, 2021), (LI, CHAN, HU, GUERRERO, 2021), *droop* hierárquico (DRAGICEVIC *et al.*, 2016a), (NGUYEN *et al.*, 2019), entre outros (CHEN *et al.*, 2016), (BRANDÃO *et al.*, 2018), (SANDGANI; SIROUSPOUR, 2018), (DEHGHANPOUR; NEHRIR, 2019).

### 2.1.1 Gerenciamento de potência centralizado

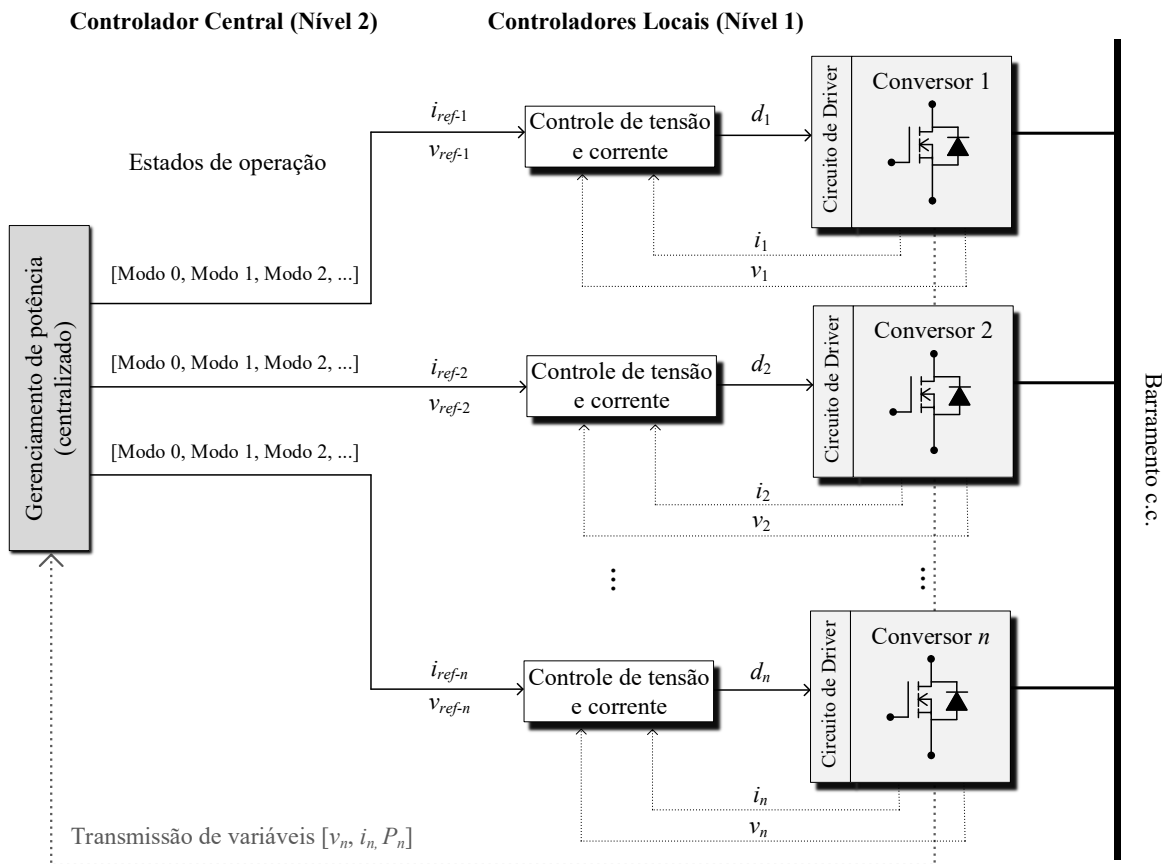
Em sistemas de controle centralizados, a estrutura de gerenciamento de potência é dividida em pelo menos dois níveis hierárquicos: *i*) um controlador central; e *ii*) controladores locais para os conversores de potência (SUN *et al.*, 2011), (GUERRERO *et al.*, 2013a), (BURMESTER *et al.*, 2017), (KUMAR *et al.*, 2017), (GHASAEI *et al.*, 2021), (KAVARI *et al.*, 2021). O controlador central atua no gerenciamento de potência enviando os sinais de referência para os controladores locais. Neste nível hierárquico é necessário um sistema de controle supervisão responsável por determinar os modos de operação, ou referências de potência para cada conversor no nível inferior (INDU; SARAVANA; NAGAMANI, 2013), (HAN *et al.*, 2017).

Para a atuação do controlador central, variáveis locais devem ser medidas e transmitidas para o sistema supervisão, portanto, é necessária uma rede de comunicação com maior largura de banda. (THALE; WANDHARE; AGARWAL, 2015), (LIU; WANG; LIU, 2015), (BURMESTER *et al.*, 2017), (HAN *et al.*, 2017), (GHASAEI *et al.*, 2021). O sistema de comunicação deve informar ao controlador central níveis de potência, tensão e/ou corrente para cada conversor de interface. Estas informações são necessárias a algoritmos de gerenciamento de potência responsáveis pela escolha dos modos de operação de cada elemento (GUERRERO *et al.*, 2013a), (GHASAEI *et al.*, 2021), (BELLINASO *et al.*, 2021), (BHOSALE, GUPTA, AGARWAL, 2021), (KAVARI *et al.*, 2021).

Na Figura 2.2, é apresentada uma estrutura de controle centralizada, onde as variáveis  $d_n$  representam as ações de controle dos conversores,  $i_{ref-n}$  e  $v_{ref-n}$  os valores de referência dos controladores locais e o vetor [Modo 0, Modo 1, Modo 2, ...] os possíveis estados de operação dos conversores de interface, definidos na camada de gerenciamento de potência (centralizado). O gerenciamento de potência é descrito de maneira genérica como sistema supervisão

Uma maneira comum de modelar as possíveis condições de operação da nanorede é através de máquinas de estados. Neste caso, modos de operação, relacionados as funcionalidades dos conversores de interface, são utilizados para a automação dos elementos de potência. Por exemplo, um conversor pode ser ligado ou desligado para garantir o equilíbrio de potência (BELLINASO, 2017), (BELLINASO *et al.*, 2021), (KAVARI *et al.*, 2021). Esta metodologia apresenta diversas características positivas para o controle da nanorede, incluindo melhor distribuição de potência e melhor resposta dinâmica dos conversores.

Figura 2.2 – Estrutura de controle centralizada para nanorredes c.c..



Fonte: adaptado de Burmester *et al.* (2017).

Por outro lado, a dependência de um sistema físico de comunicação e da ocorrência de eventos discretos, torna a operação com máquinas de estados susceptível a falhas de comunicação e erros de medidas. Este é um limitador importante para a aplicação de abordagens centralizadas em nanorredes, porque neste tipo de organização uma falha no controlador central ou no *link* de comunicação torna todo o sistema inoperante (BELLINASSO, 2017), (BUERGUER *et al.*, 2019), (DEHGHANPOUR; NEHRIR, 2019), (GHASAEI *et al.*, 2021), (KAVARI *et al.*, 2021).

### 2.1.2 Controladores descentralizados

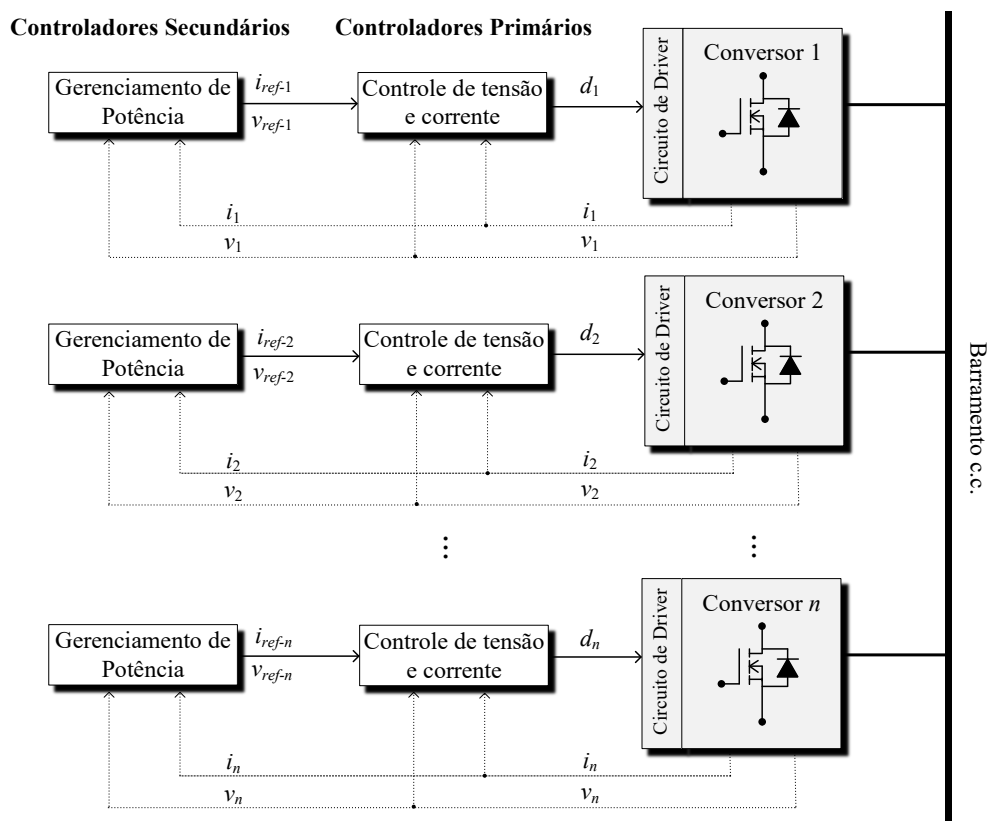
Em sistemas de controle descentralizados, os elementos de potência não se comunicam entre si e o balanceamento de potência deve ser alcançado sem uma central de controle. Neste caso não existe uma hierarquia de controle e o equilíbrio de potência pode ser obtido à nível



primário. Isso permite que o sistema se mantenha funcional, mesmo sob falhas em um dos controladores locais (GUERRERO *et al.*, 2013a), (CHEN *et al.*, 2016), (DRAGICEVIC *et al.*, 2016a), (LI *et al.*, 2016), (NASIRIAN *et al.*, 2016), (LI *et al.*, 2016), (MENG *et al.*, 2017), (BAGHAEI; MIRSALIM; GHAREHPETIAN, 2018), (SANDGANI; SIROUSPOUR, 2018), (DEHGHANPOUR; NEHRIR, 2019), (LI, CHAN, HU, GUERRERO, 2021).

Na Figura 2.3 é apresentada a estrutura de controle descentralizada para o gerenciamento de potência em nanorredes. O bloco de gerenciamento é responsável pela geração dos sinais de referência para os controladores primários. Neste caso, uma estratégia de compartilhamento de potência é necessária para a estabilidade do sistema. Comumente esta camada de controle é implementada com uma malha externa baseada em *droop*.

Figura 2.3 – Estrutura de controle descentralizada para nanorredes c.c..



Fonte: adaptado de Burmester *et al.* (2017).

Como discutido no Capítulo 1, controladores *droop* apresentam diversas características positivas para o gerenciamento de nanorredes, especialmente devido a robustez de operação, porque permitem obter equilíbrio de potência a nível primário. Por outro lado, não é possível

operar em um ponto ótimo/nominal devido a malha de compartilhamento de potência. Além disso, controladores *droop* requerem um compromisso entre distribuição de potência e regulação de tensão no barramento c.c., o que não ocorre em controladores centralizados (GUERRERO *et al.*, 2013a), (WU *et al.*, 2015), (UNAMUNO, BARRENA, 2015), (DRAGICEVIC *et al.*, 2016a), (LI *et al.*, 2020). Nesta abordagem, o nível secundário é responsável pela parametrização dos controladores *droop*, como por exemplo, regras de adaptação dos coeficientes de decaimento (AUGUSTINE, MISHRA, LAKSHMINARASAMMA, 2015), (TAYAB *et al.*, 2017), (LI, CHAN, HU, GUERRERO, 2021).

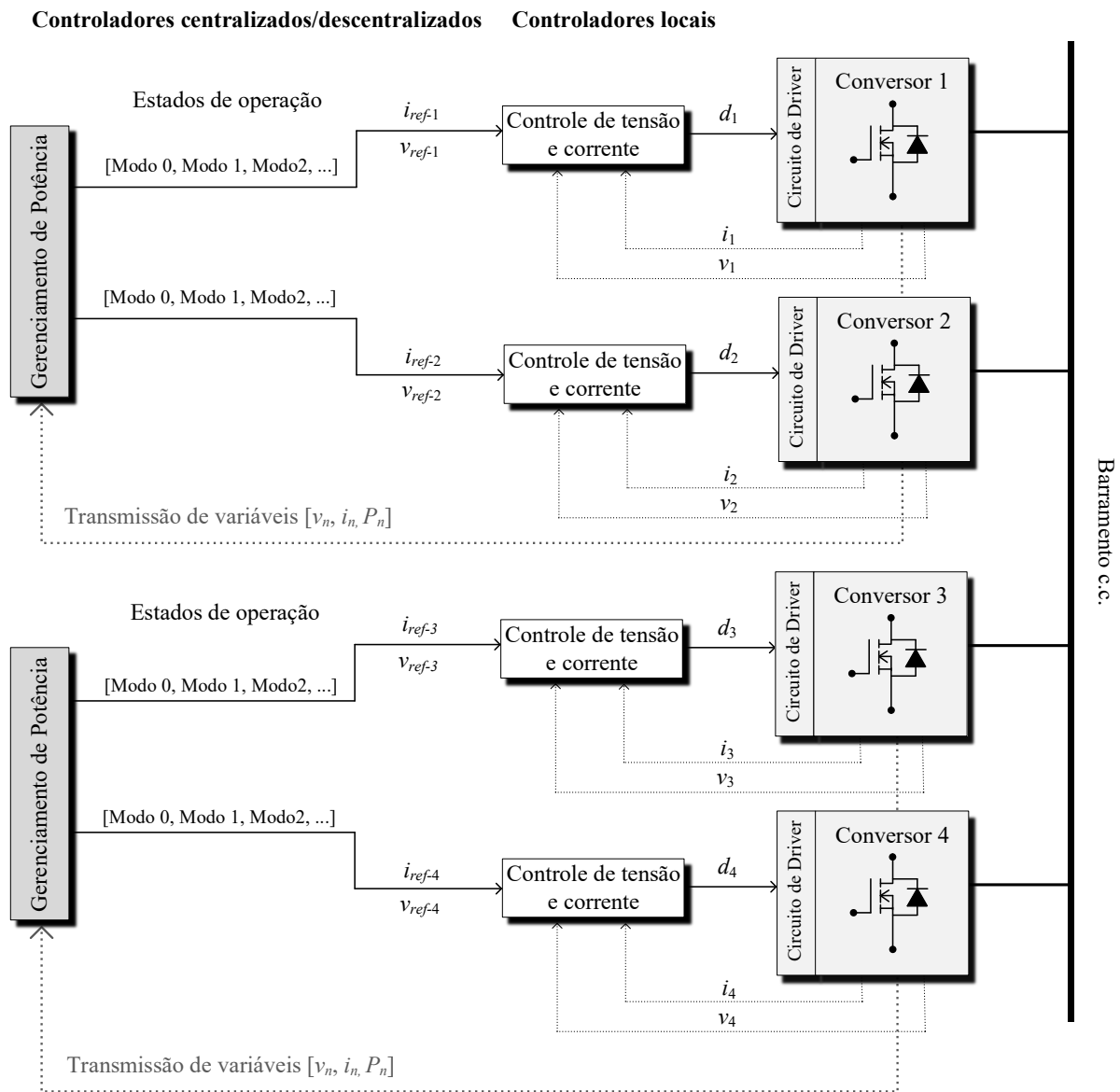
### 2.1.3 Controladores centralizados/descentralizados

Muitas estratégias de controle procuram unir vantagens de soluções centralizadas e descentralizadas. Em diferentes trabalhos, características de controladores centralizados e descentralizados são combinadas para que seja possível atingir um alto grau de coordenação com redes de comunicação simplificadas ou com menor largura de banda (DRAGICEVIC *et al.*, 2016a), (LI *et al.*, 2016), (NASIRIAN *et al.*, 2016), (BURMESTER *et al.*, 2017), (TAYAB *et al.*, 2017), (BAGHAEE; MIRSALEM; GHAREHPETIAN, 2018), (SANDGANI; SIROUSPOUR, 2018), (DEHGHANPOUR; NEHRIR, 2019), (LI *et al.*, 2020), (SONG, MCCANN, JANG, 2021).

Para a implementação de controladores distribuídos centralizados/descentralizados, diferentes abordagens são possíveis. Uma solução é dividir sistemas maiores em subsistemas com controle centralizado. Neste caso, os controladores centrais devem se comunicar entre si para a coordenação global da rede (BURMESTER *et al.*, 2017), (KUMAR *et al.*, 2017), (LI, CHAN, HU, GUERRERO, 2021), (SONG, MCCANN, JANG, 2021). Por exemplo, uma microrrede com controle centralizado/descentralizado pode ser organizada em diferentes nanorredes com controle local centralizado, conforme ilustrado na Figura 2.4.

Para tratar das estratégias de gerenciamento de potência (centralizadas, descentralizadas e distribuídas) de maneira específica, na sequência do trabalho, serão abordadas as principais estratégias de controle encontradas na literatura atual, incluindo controladores *droop*, *droop* hierárquico, *droop* adaptativo, máquinas de estados, sinalização do barramento c.c. e matrizes de resposta ao preço.

Figura 2.4 – Estrutura de controle centralizada/descentralizada para o gerenciamento de nanorredes.



Fonte: adaptado de Burmester *et al.* (2017).

Após a apresentação das estruturas de controle, na sequência do trabalho serão discutidas as possíveis estratégias para o gerenciamento de potência no contexto de nanorredes.

## 2.2 CONTROLADORES DROOP

Uma estratégia simples para o controle de tensão e compartilhamento de potência entre conversores é o método de controle de tensão baseado em controle *droop*, ou controle por

decaimento (GUERRERO *et al.*, 2013a), (DRAGICEVIC *et al.*, 2016a), (BUERGER *et al.*, 2019), (HUANG *et al.*, 2021).

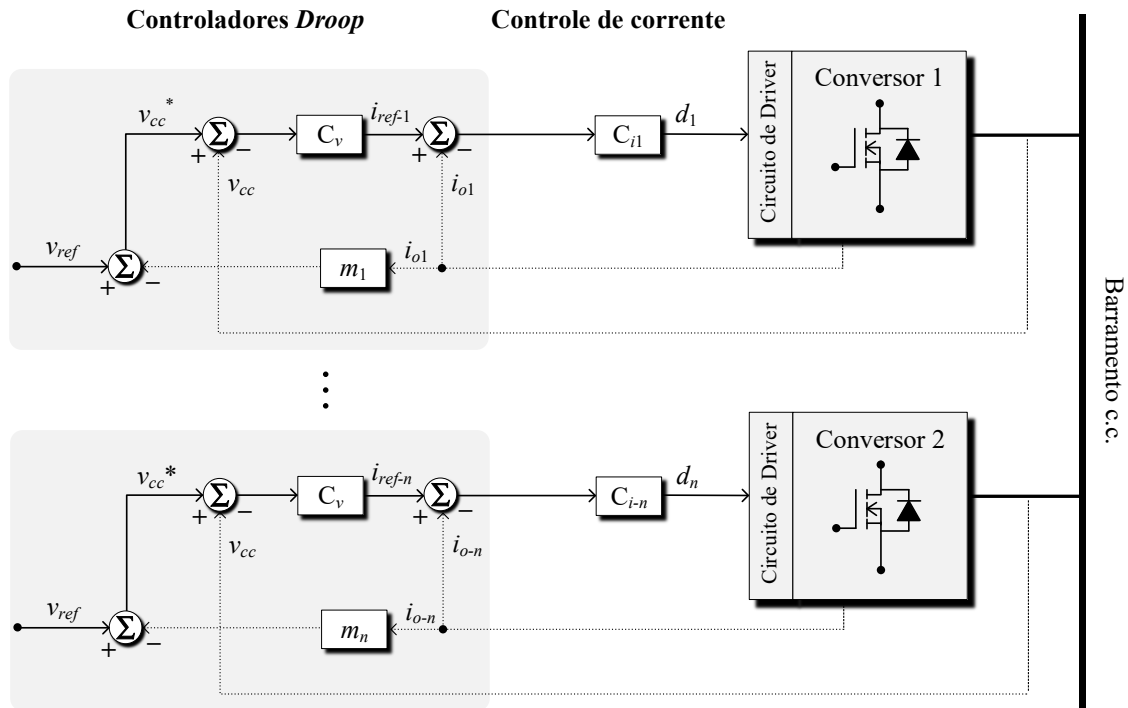
Considerando controladores *droop*, o gerenciamento é baseado em compartilhamento de potência (PAPADIMITRIOU *et al.*, 2015), (TAYAB *et al.*, 2017), (MOKHTAR, MAREI, EL-SATTAR, 2019), (LI, CHAN, HU, GUERRERO, 2021). Neste caso, o compartilhamento de potência será proporcional ao coeficiente de decaimento  $m$ , porque para maiores valores de  $m$ , melhor será caracterizado o compartilhamento de potência, ao preço que maiores serão os desvios de tensão no barramento c.c. (PAPADIMITRIOU *et al.*, 2015), (DRAGICEVIC *et al.*, 2016), (SANTOS NETO *et al.*, 2020). Neste caso, deve haver um compromisso entre boa regulação de tensão e compartilhamento de potência. Os coeficientes de decaimento são definidos de maneira direta pela relação (2.1) (KIM, CHOI, CHO, 2002), (PAPADIMITRIOU *et al.*, 2015), (DRAGICEVIC *et al.*, 2016), (MENG *et al.*, 2017), (BUERGER *et al.*, 2019), (SANTOS NETO *et al.*, 2020).

$$m = \frac{\Delta v}{i_{nom}} \quad (2.1)$$

Considerando que a corrente nominal ( $i_{nom}$ ) é um parâmetro conhecido, o critério de projeto para a escolha dos coeficientes de decaimento ( $m$ ) é a máxima variação de tensão permitida ao barramento c.c.. Valores recorrentes para a escolha do desvio de tensão estão entre 5% (MOKHTAR, MAREI, EL-SATTAR, 2019), (LI, CHAN, HU, GUERRERO, 2021), (HUANG *et al.*, 2021), e 10% da tensão nominal do barramento c.c. (GUERRERO *et al.*, 2013a), (DRAGICEVIC *et al.*, 2016a), (LI *et al.*, 2016), (NASIRIAN *et al.*, 2016), (MENG *et al.*, 2017), (BAGHAE; MIRSALIM; GHAREHPETIAN, 2018). Para valores menores, é difícil garantir um compartilhamento de potência adequando, devido a maior influência de impedâncias de linha em relação a quedas de tensão, especialmente em sistemas em ELVDC. Publicações anteriores também consideravam maiores desvios de tensão no barramento c.c. (KIM, CHOI, CHO, 2002). Entretanto, estes desvios não são ideais às cargas, que em nanorredes, podem ser conectadas diretamente ao barramento c.c. (BURMESTER *et al.*, 2017), (KUMAR *et al.*, 2017), (TAYAB *et al.*, 2017).

Para a implementação do gerenciamento baseado em *droop*, é considerada a estrutura de controle apresentada na Figura 2.5. Nesta figura, os blocos  $C_v$  e  $C_i$  representam as malhas de controle de tensão e corrente, respectivamente. A tensão do barramento c.c. ( $v_{cc}$ ) deve ser comparada com a referência efetiva ( $v_{cc}^*$ ). Para o cálculo da referência  $v_{cc}^*$ , é utilizada a corrente de saída ( $i_o$ ), que multiplicada por  $m$ , é subtraída da referência  $v_{ref}$ .

Figura 2.5 – Diagrama de conversores c.c.-c.c. em paralelo com controladores *droop*.



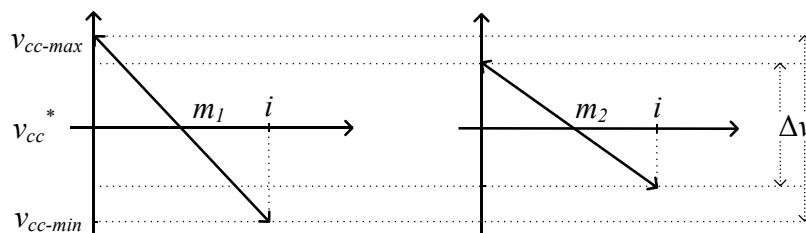
Fonte: adaptado de Buerger *et al.* (2019).

É possível verificar que nesta estratégia sempre haverá um desvio de tensão no barramento c.c., porque:

$$v_{cc}^* = v_{ref} - m \cdot i_o \tag{2.2}$$

Adicionalmente, é verificado em (2.2) que quanto maior a potência processada, maiores serão os desvios de tensão. Portanto, a qualidade de energia no barramento c.c. será reduzida para maiores demandas de carga. A relação (2.2) é caracterizada por curvas de decaimento, onde a inclinação da reta é proporcional aos coeficientes (*m*). Na Figura 2.6 são ilustradas curvas características para os coeficientes  $m_1 > m_2$ .

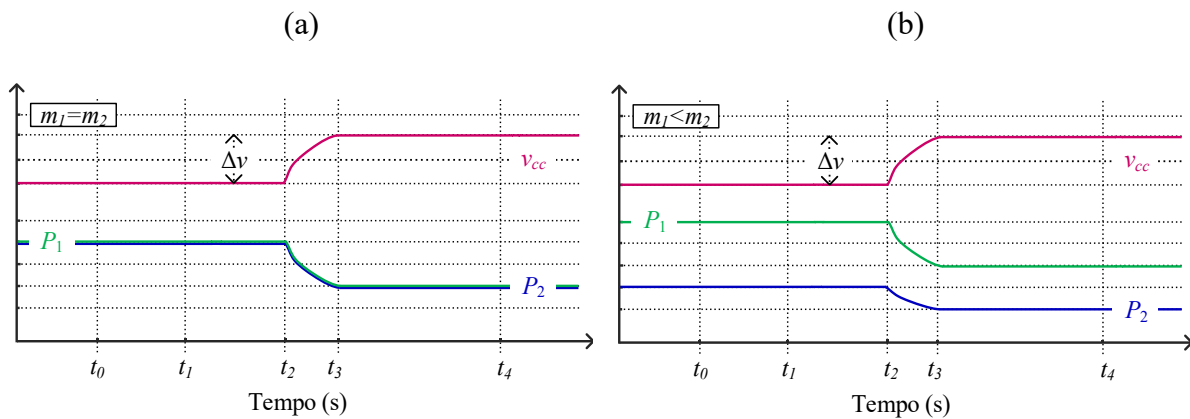
Figura 2.6 – Curvas de controladores *droop* com diferentes ganhos de decaimento, considerando  $m_1 > m_2$ .



Fonte: adaptado de Tayab *et al.* (2017).

A Figura 2.6 mostra que a regulação de tensão é comprometida à medida que os coeficientes de decaimento aumentam. A Figura 2.7 mostra um exemplo de resposta transitória, considerando dois conversores semelhantes operando com controle *droop*. Primeiro, quando o coeficiente de decaimento é igual, ambos os conversores processam o mesmo nível de potência conforme ilustra a Figura 2.7 (a). Entretanto, quando  $m_1$  é menor que  $m_2$ , o compartilhamento de potência é inversamente proporcional ao coeficiente de decaimento de cada conversor. Isto é mostrado na Figura 2.7 (b).

Figura 2.7 – Resposta transitória dos controladores *droop* para dois elementos, considerando: (a) coeficientes de decaimento  $m_1=m_2$ ; (b) coeficientes  $m_1 \neq m_2$ .



Fonte: autoria própria.

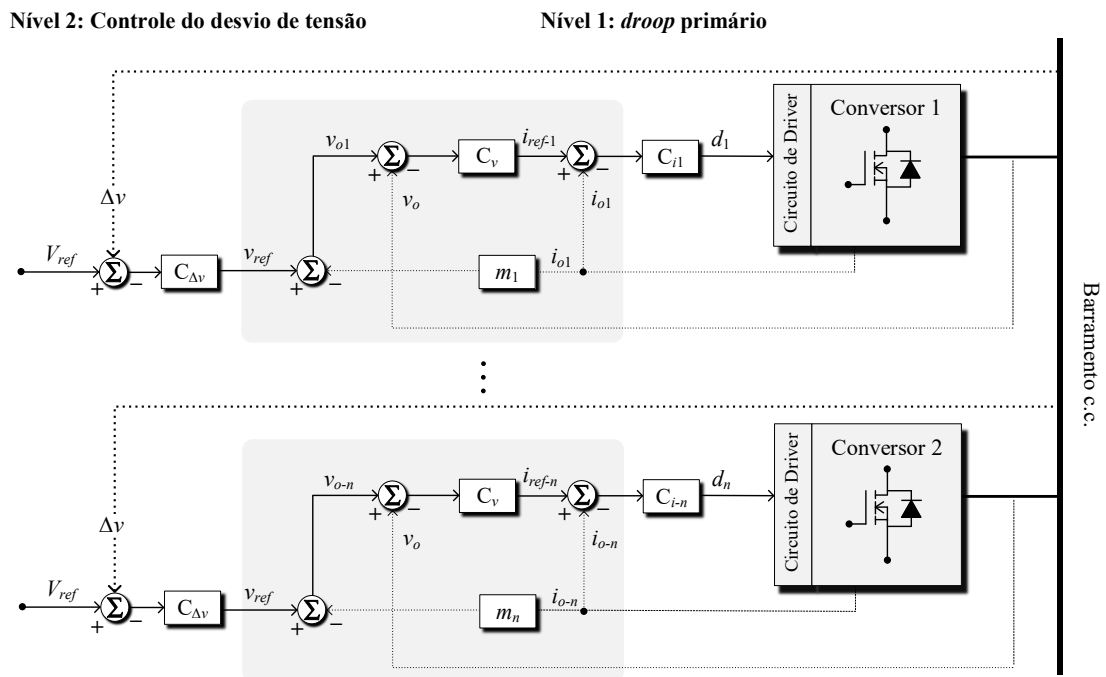
Aqui é possível notar uma desvantagem dos controladores *droop* em relação ao ponto ótimo/nominal de operação dos conversores. Considerando coeficientes de decaimento fixos e sem *links* de comunicação, todos os elementos de potência devem contribuir para a regulação de tensão do barramento c.c. (GUERRERO *et al.*, 2011), (GUERRERO *et al.*, 2013a), (DRAGICEVIC *et al.*, 2016a), (CARVALHO *et al.*, 2021a).

No contexto de nanoredes e edifícios autossuficientes em energia, a aplicação direta de controladores *droop* convencionais, como ilustrado na Figura 2.7, reduz significativamente a eficiência da estratégia de gerenciamento, porque não permite prever com exatidão, quando um elemento de potência deve ser ligado ou desligado. Por exemplo, havendo alta disponibilidade de fontes de energias renováveis, geradores não renováveis e armazenadores de energia podem ser dispensados, sendo ligados apenas em casos críticos de operação (SCHONBERGER *et al.*, 2006a), (SCHONBERGER *et al.*, 2006b), (KUN *et al.*, 2011), (BELLINASO *et al.*, 2016), (BELLINASO *et al.*, 2021). Adicionalmente, é possível observar na Figura 2.6, o desvio de tensão ( $\Delta v$ ) resultante dos controladores *droop*.

### 2.3 CONTROLE DROOP HIERÁRQUICO

Para compensar o desvio de tensão, inerente aos controladores *droop*, em Dragicevic *et al.* (2016a), é proposta uma malha externa de controle adicional aos controladores *droop* a nível primário. O controle hierárquico apresentado em Dragicevic *et al.* (2016a), representado na Figura 2.8, resulta em dois níveis de controle: *i*) o primeiro consiste no próprio controle *droop*, necessário para o compartilhamento de potência; e *ii*) o segundo está relacionado com a malha de compensação do desvio de tensão. O desvio de tensão é medido no barramento c.c. e deve ser enviado para todos os controladores no Nível 1. Neste caso um *link* de comunicação é necessário, mesmo que com largura de banda limitada. Posteriormente, esta estratégia também foi utilizada em Buerger *et al.* (2019) e Santos Neto *et al.* (2020).

Figura 2.8 – Controle *droop* hierárquico para redução dos desvios de tensão no barramento.



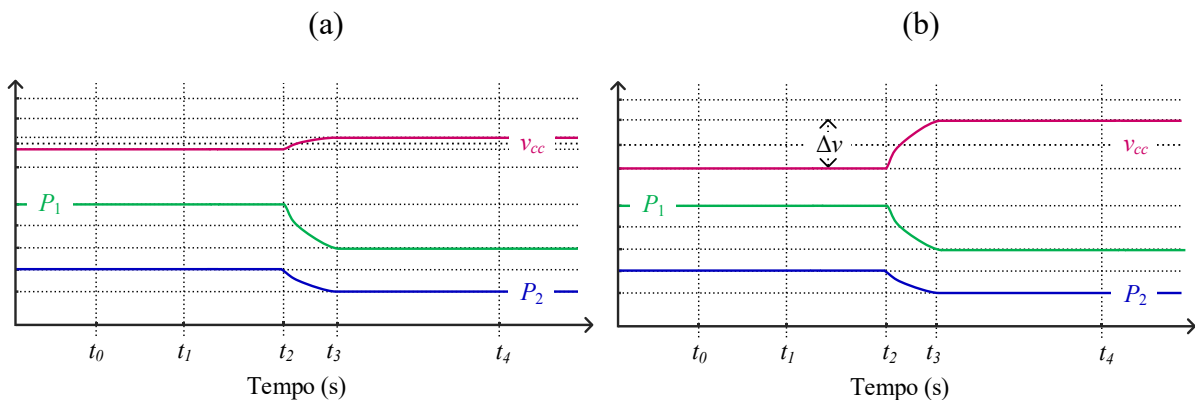
Fonte: adaptado de Dragicevic *et al.* (2016a).

De acordo com o diagrama apresentado na Figura 2.8, a resposta do controle no segundo nível hierárquico deve ser enviada para todos os controladores primários. Esta resposta atua diretamente na referência de tensão. Isso permite reduzir os erros de tensão no barramento c.c., porque a relação das tensões (2.2) pode ser reescrita conforme (2.3):

$$v_{cc}^* = v_{ref} - m \cdot i_o + C_{\Delta v} [V_{ref} - \Delta v] \quad (2.3)$$

Devido ao *link* de comunicação, o controle *droop* hierárquico apresenta maior complexidade de implementação, quando comparado a estratégia convencional. Entretanto, ainda há robustez de operação, visto que apenas ocorrerão maiores desvios de tensão em casos de falta da comunicação (MOKHTAR, MAREI, EL-SATTAR, 2019), (LEE, KIM, KIM, MOON, 2020), (BHOSALE, GUPTA, AGARWAL, 2021), (HUANG *et al.*, 2021), (LI, CHAN, HU, GUERRERO, 2021). Para exemplificar a resposta transitória desta proposta, duas situações são apresentadas na Figura 2.9. Quando o controle *droop* hierárquico, Figura 2.9 (a), é considerado, há uma significativa redução do desvio de tensão ( $\Delta v$ ). Em casos de falhas de comunicação, Figura 2.9 (b), apenas o desvio de tensão é aumentado. Isso ocorre porque os níveis de controle são independentes, permitindo que o sistema continue operando apenas com os controladores *droop* primários.

Figura 2.9 – Resposta transitória do controle *droop* hierárquico para redução do desvio de tensão no barramento c.c.: (a) redução do desvio de tensão com a malha de controle externa; (b) controle *droop* convencional.



Fonte: autoria própria.

## 2.4 CONTROLE DROOP ADAPTATIVO

Uma questão importante relacionada a aplicação de controladores *droop* são as características naturais de cada fonte de geração ou cargas. Por exemplo, geradores fotovoltaicos atuam com potência variável, enquanto bancos de baterias apresentam variações de estado de carga (TAYAB *et al.*, 2017), (LI, CHAN, HU, GUERRERO, 2021). Para garantir que o compartilhamento de potência seja adequado a tais condições, diferentes trabalhos propõem estratégias adaptativas para caracterizar com maior exatidão as limitações de potência



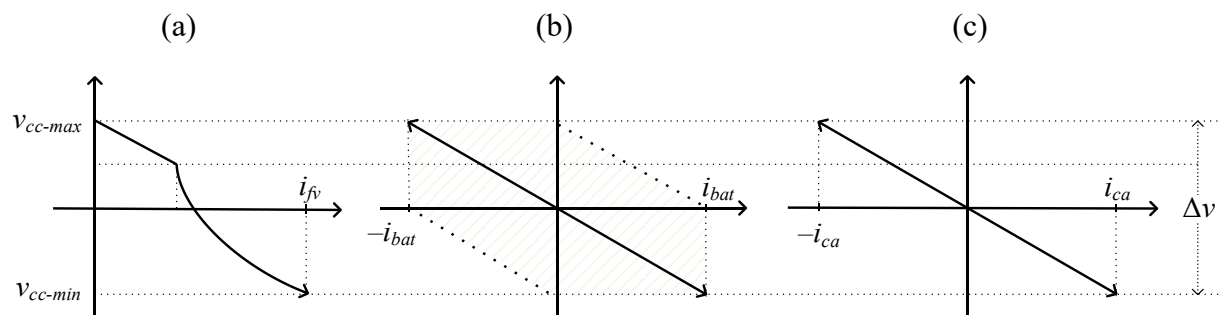
de cada conversor (MOKHTAR, MAREI, EL-SATTAR, 2019), (LEE, KIM, KIM, MOON, 2020), (BHOSALE, GUPTA, AGARWAL, 2021), (HUANG *et al.*, 2021), (LI *et al.*, 2021).

Em relação ao compartilhamento de potência, é notável que os controladores *droop*, hierárquicos ou convencionais, apresentam um grau de liberdade relacionado aos coeficientes de decaimento ( $m$ ). Esse parâmetro pode ser utilizado para adaptar o sistema em função das características próprias de cada elementos de potência (AUGUSTINE; MISHRA; LAKSHMINARASAMMA, 2015), (TAYAB *et al.*, 2017), (MOKHTAR, MAREI, EL-SATTAR, 2019), (SONG, MCCANN, JANG, 2021).

Considerando coeficientes de decaimento adaptativos, diferentes trabalhos têm proposto funções para gerenciar parâmetros como estado de carga das baterias, custos, eficiência, entre outros (AUGUSTINE; MISHRA; LAKSHMINARASAMMA, 2015), (MORAIS, LOPES, 2016), (MOKHTAR, MAREI, EL-SATTAR, 2019), (SONG, MCCANN, JANG, 2021).

Em Cvetkovic (2010) por exemplo, a estratégia de gerenciamento de potência é associada a sinalização de tensão do barramento c.c.. Neste caso, os controladores *droop* são adaptados em resposta as variações de tensão no barramento e as características próprias de cada fonte de geração e cargas. Este exemplo é ilustrado na Figura 2.10, onde são apresentadas curvas de *droop* adaptadas para geradores fotovoltaicos, armazenamento de energia e inversores de tensão.

Figura 2.10 – Curvas dos controladores *droop* associadas a sinalização do barramento c.c.: a) conversores para o processamento de energia FV; b) sistemas de armazenamento de energia; c) inversores de tensão (c.c.-c.a.).



Fonte: adaptado de Cvetkovic (2010).

Neste ponto, é possível observar um grau de liberdade importante para o gerenciamento de potência com controle *droop*: enquanto máquinas de estados e controladores centralizados, dependem de modelos pré-definidos e da ocorrência de eventos discretos, os controladores *droop* são exclusivamente dependentes das curvas de decaimento ( $v-i$ ). Isso significa que

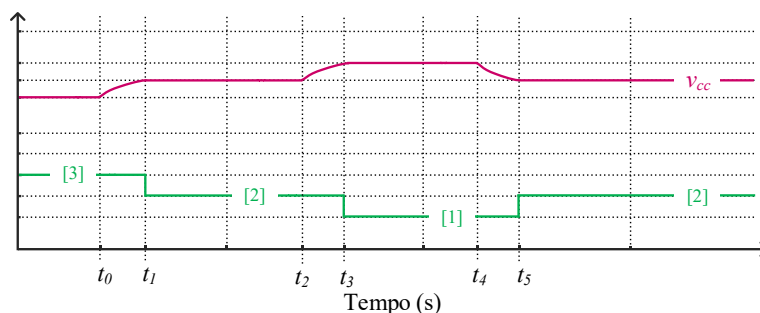
enquanto controladores centralizados dependem de algoritmos de otimização *off-line*, os controladores *droop* podem ser otimizados ou adaptados em tempo real, simplesmente adaptando os ganhos de decaimento em resposta às condições de operação da nanorrede (MAHMOOD; MICHAELSON; JIANG, 2015), (BHOSALE, GUPTA, AGARWAL, 2021), (HUANG *et al.*, 2021), (LI *et al.*, 2021).

## 2.5 SINALIZAÇÃO DE TENSÃO DO BARRAMENTO C.C.

Uma estratégia simples para automação de sistemas de pequeno porte, sem *links* de comunicação complexos é a sinalização de tensão no barramento c.c., ou *dc bus signaling* (*DBS*) (BRYAN; DRUKE; ROUND, 2004), (SUN *et al.*, 2011), (WU *et al.*, 2015), (BELLINASO, 2017). Nesta proposta, tensões de comparação são predefinidas para sinalizar a ocorrência de eventos discretos, como por exemplo a conexão ou desconexão de cargas e fontes à nanorrede (WU *et al.*, 2015), (LI *et al.*, 2020), (BELLINASO *et al.*, 2021).

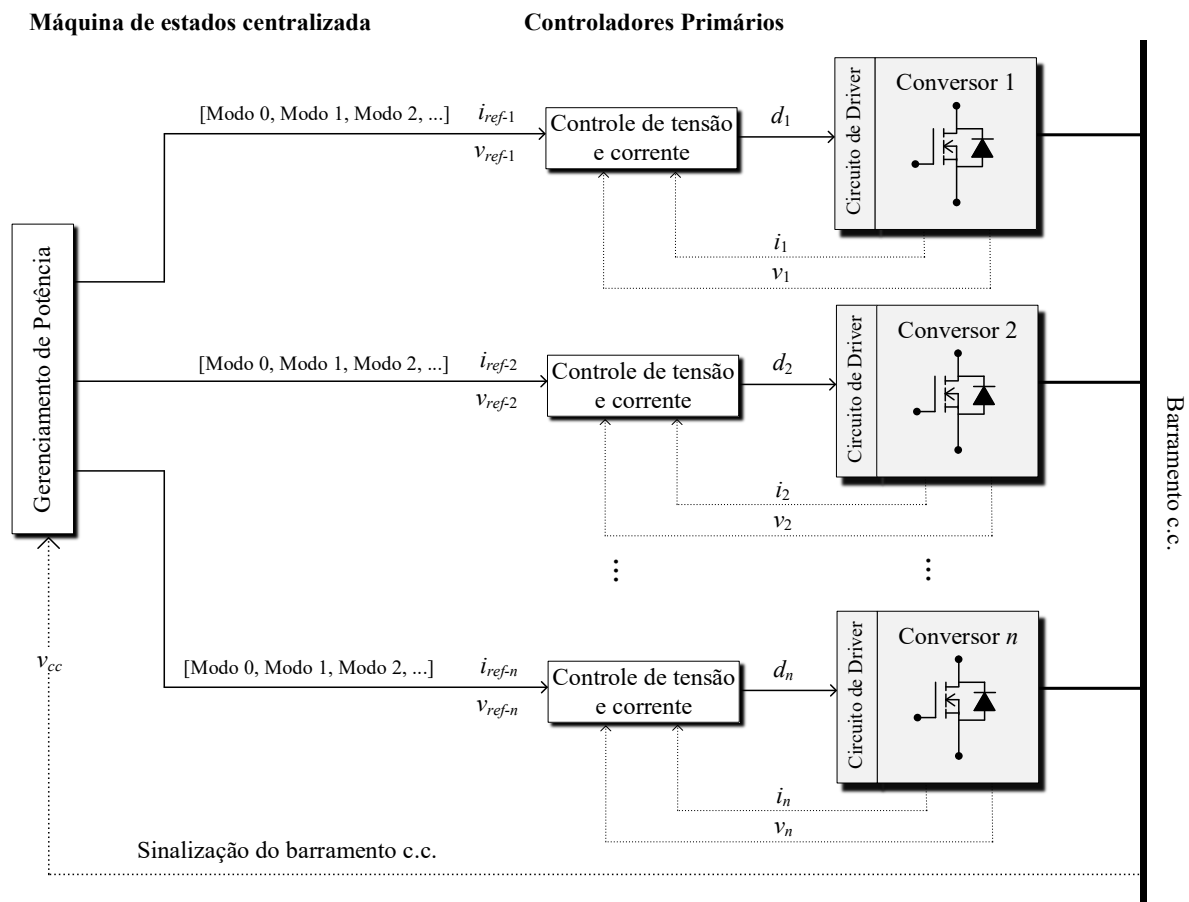
É necessário notar que o *DBS*, não é efetivamente uma estratégia de gerenciamento de potência, porém é um meio indireto de comunicação entre os elementos da nanorrede. Neste método, as variações de tensão são utilizadas para comunicar ao gerenciamento as condições de operação da nanorrede (LI *et al.*, 2020). Para o gerenciamento, o *DBS* deve ser associado a um modelo de gerenciamento pré-definido, e o equilíbrio de potência é obtido a partir deste modelo. Exemplos de estratégias de controle associadas a sinalização do barramento c.c. são as máquinas de estados, e também controladores *droop* (BRYAN; DRUKE; ROUND, 2004), (BELLINASO *et al.*, 2021), (CARVALHO *et al.*, 2021a). Na Figura 2.11 é ilustrada a evolução de estados [1, 2, 3, ...], considerando o gerenciamento de potência baseado em *DBS*.

Figura 2.11 – Exemplo de mudanças de estados de operação em estratégias de gerenciamento de potência baseado em sinalização do barramento c.c. e máquinas de estados.



A implementação de uma estratégia de gerenciamento de potência com *DBS*, é apresentada na Figura 2.12. Neste exemplo o gerenciamento de potência é responsável por definir os modos de operação em resposta a sinalização de tensão (SUN *et al.*, 2011), (WU *et al.*, 2015), (BELLINASO, 2017), (CARVALHO *et al.*, 2021a), (CARVALHO *et al.*, 2021b). Nas camadas inferiores de controle, os conversores definem as referências de tensão ou corrente, em resposta aos modos de operação.

Figura 2.12 – Estrutura de controle descentralizada com sinalização do barramento c.c. (*DBS*).



Fonte: Bellinaso (2017).

Do ponto de vista de estrutura, o sistema representado na Figura 2.12 é uma estratégia de controle centralizada. Por outro lado, a sinalização do barramento c.c. não está necessariamente relacionada a organização do sistema de controle, podendo ser aplicada a estruturas centralizadas e descentralizadas, incluindo controladores *droop* (SUN *et al.*, 2011), e controladores *droop* adaptativos (LI *et al.*, 2018b), (AUGUSTINE; MISHRA; LAKSHMINARASAMMA, 2015), (TAYAB *et al.*, 2017), (SONG, MCCANN, JANG, 2021).

## 2.6 MÁQUINAS DE ESTADOS

Em gerenciamento de potência, máquinas de estados e sistemas supervisórios são utilizados para modelar determinadas condições de operação da nanorrede. Neste caso, o objetivo do sistema de controle é verificar as possibilidades de mudanças de estados com o objetivo de garantir o equilíbrio de potência (SUN *et al.*, 2011), (LI *et al.*, 2018b), (BELLINASO *et al.*, 2021), (CARVALHO *et al.*, 2021a). Em abordagens com máquinas de estados, os modos de operação dos conversores são modificados em resposta a ocorrência de eventos discretos. Esses eventos devem ser associados a condições pré-determinadas de operação da nanorrede, como por exemplo, redução do estado de carga de baterias, tarifas da rede elétrica, e mesmo a conexão e desconexão de novos elementos à rede (SUN *et al.*, 2011), (BELLINASO *et al.*, 2021).

Na Tabela 2.1 é apresentado o modelo de Schwetner *et al.* (2013), que inclui um gerador fotovoltaico (FV), um banco de baterias, e uma única carga gerenciável. Para o gerador FV são definidos os modos de operação (0) quando o gerador está desligado, (1) para operação com potência limitada e (2) para o SPMP (seguimento do ponto de máxima potência). Para a carga são definidos os modos (-2) quando ligada e (0) para desligada. Para o banco de baterias são utilizados os modos (-2, -1, 0, 1 e 2), sendo (-1/1) operação com potência limitada e (-2/2) operação em potência nominal, onde os sinais (-) e (+) dos modos de operação representam absorção ou fornecimento de energia à nanorrede, (0) é quando as baterias estão desligadas. A combinação de todos estes modos resulta em 18 estados possíveis, conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Exemplo de máquina de estados para o gerenciamento de potência.

	<b>FV</b>	<b>Banco de Baterias</b>	<b>Carga 1</b>	<b>Estados</b>
1.	0	-2/0	-2/0	$1 \cdot 2 \cdot 2 = 4$
2.	1	-2/0	-2/0	$1 \cdot 2 \cdot 2 = 4$
3.	2	-1/0	-2/0	$1 \cdot 2 \cdot 2 = 4$
4.	2	0/1	-2/0	$1 \cdot 2 \cdot 2 = 4$
5.	2	0/2	0	$1 \cdot 2 \cdot 1 = 2$
<b>Total</b>				18

Considerando o gerenciamento com máquinas de estados, é possível definir exatamente quando uma fonte ou carga será ligada ou desligada, em função da programação. Neste caso,

um *link* de comunicação com alta largura de banda é necessário, porque um controlador central define e informa o estado de operação para cada conversor (WU *et al.*, 2015), (DIAZ *et al.*, 2017), (CARVALHO *et al.*, 2021). Isso melhora significativamente a eficiência do sistema de controle, porque não são necessárias malhas de compartilhamento de potência.

Por outro lado, uma vez que máquinas de estados dependem de um modelo predefinido, todo o gerenciamento de potência deve ser reprojetoado para adicionar novos elementos a nanorrede (BELLINASSO *et al.*, 2021), (CARVALHO *et al.*, 2021). Em uma comparação direta com controladores descentralizados, enquanto os controladores *droop*, naturalmente apresentam a funcionalidade *plug-and-play*, se novos elementos são incluídos no gerenciamento de potência, a máquina de estados deve ser totalmente reprojetoada (*offline*).

Além disso, a complexidade do gerenciamento aumenta exponencialmente com o número de elementos da nanorrede, porque a máquina de estados é definida através da verificação de todas as possibilidades de mudanças de estados. Na Tabela 2.2 é considerada a adição de uma fonte, e uma carga ao exemplo anterior.

Tabela 2.2 – Exemplo de máquinas de estados, considerando a adição de novos elementos a nanorrede

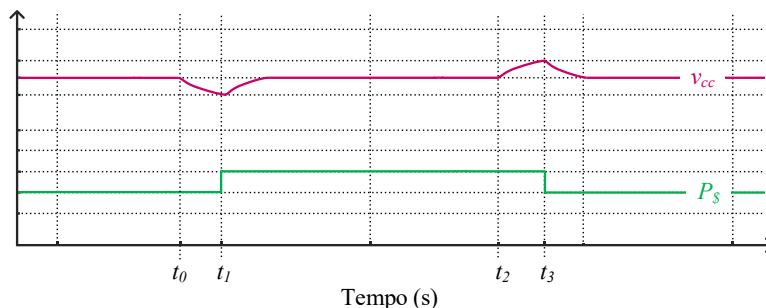
	FV	Baterias	Carga 1	Fonte	Carga 2	Estados
1.	0	-2/0	-2/0	0	-2/0	$1 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 = 8$
2.	1	-2/0	-2/0	0	-2/0	$1 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 = 8$
3.	2	-1/0	-2/0	0	-2/0	$1 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 = 8$
4.	2	0/1	-2/0	0/1	-2/0	$1 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 16$
5.	2	0/2	0	0/2	-2/0	$1 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 2 = 8$
6.	2	0/2	0	0/2	0	$1 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1 = 4$
<b>Total</b>						52

No gerenciamento apresentado na Tabela 2.1, são resultados 18 estados de operação para três elementos de potência: gerador FV, baterias e carga. Considerando a adição de uma fonte e uma carga, 52 estados são apresentados na Tabela 2.2. O resultado é que a adição de novas fontes, armazenadores de energia ou cargas, pode aumentar consideravelmente a complexidade do algoritmo de controle.

## 2.7 MATRIZES DE RESPOSTA AO PREÇO

Em Bellinaso (2017), a sinalização do barramento c.c. é relacionada com a formação de um preço interno ( $P_s$ ), que assume valores discretos e pré-determinados [\$0, \$1, \$2, ...]. Considerando que variações transitórias de tensão são relacionadas a falta ou excesso de energia na nanorede, a variável preço pode ser calculada em função da sinalização de tensão no barramento c.c., sendo esse preço diminuído (\$-1) quando há variação positiva de tensão, e aumentado (\$+1) quando há variação negativa (BELLINASO, 2017). O conceito de preço permite definir os modos de operação como *compra* e *venda* de energia. Por exemplo, uma fonte pode atuar vendendo energia em resposta ao preço, ou mesmo sendo desligada quando não há vantagens nesta transação (CARVALHO *et al.*, 2021a). Na Figura 2.13 é apresentado um exemplo da proposta de preços, mostrando a mudança do preço com uma redução e um aumento da tensão do barramento c.c. ( $v_{cc}$ ).

Figura 2.13 – Formação de preço em função da sinalização de tensão do barramento c.c..



Fonte: adaptado de Carvalho *et al.* (2021a).

É necessário mencionar que nesta proposta o preço é apenas um sinal de controle, utilizado para definir os modos de operação dos conversores de potência e cargas. Para superar as limitações de projeto das máquinas de estados convencionais, em Bellinaso (2017) e posteriormente em Bellinaso *et al.* (2021) foram propostas matrizes de resposta ao preço (MRPs) como metodologia de projeto para o gerenciamento de potência. A contribuição destes trabalhos, nada mais é do que utilizar o conceito de preço para simplificar o projeto da máquina de estados, sendo que cada preço, definido por um valor discreto [\$0, \$1, \$2, ...] representa um estado diferente da máquina de estados que controla o sistema. Nesta proposta, os modos de operação dos conversores são definidos da seguinte forma:

- **Cargas:** demandam energia do barramento c.c., definindo um fluxo de potência negativo. Cargas podem operar em três modos de operação: desligadas (0), controlando a tensão do barramento c.c.; (-1), quando possível operar com potência limitada; e ligadas com potência nominal (-2).
- **Fontes:** atuam fornecendo um fluxo de potência positivo para o barramento. Fontes podem operar em três possíveis modos de operação: desligadas (0), controlando a tensão do barramento c.c. (1); ou com potência nominal (2).
- **Elementos bidirecionais:** podem operar tanto como fontes, quanto como cargas. Desta forma, podem operar em todos os possíveis modos de operação: (-2, -1, 0, 1, 2), onde o sinal do modo de operação corresponde a absorção (-) ou injeção (+) de potência no barramento c.c.. Exemplos de elementos bidirecionais são os bancos de baterias e conversores c.c.-c.a. conectados à rede elétrica, que podem atuar como retificadores (fonte) ou como inversores (carga).

Considerando os modos de operação (-2, -1, 0, 1, 2), uma MRP é uma matriz que relaciona os modos de operação, com o preço calculado e informado por um controlador centralizado. Por exemplo, um gerador fotovoltaico pode ser representado pela  $MRP_{fv}$ , que atribui os modos de operação (0, 1, 2) aos preços [\$0, \$1, \$2, ...], conforme (2.4).

$$\begin{aligned} \text{preço} &= [ \$0 \quad \$1 \quad \$2 \quad \$3 \quad \$4 \quad \$5 \quad \$6 \quad \$7 ] \\ MRP_{fv} &= [ 0 \quad 1 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 ] \end{aligned} \quad (2.4)$$

O modo de operação do conversor é obtido acessando o índice da matriz/vetor relacionado ao preço. Neste caso o gerador fotovoltaico é desligado (0) com preço igual a \$0, controla a tensão do barramento (+1) com preço \$1 e atua em SPMP (+2) quando o preço é igual ou superior a \$2. Para uma carga, uma MRP semelhante é dimensionada considerando os modos de operação (-2, -1, 0). Nesta estratégia, o equilíbrio de potência é alcançado através da coordenação dos modos de operação em resposta ao preço (CARVALHO *et al.*, 2021a).

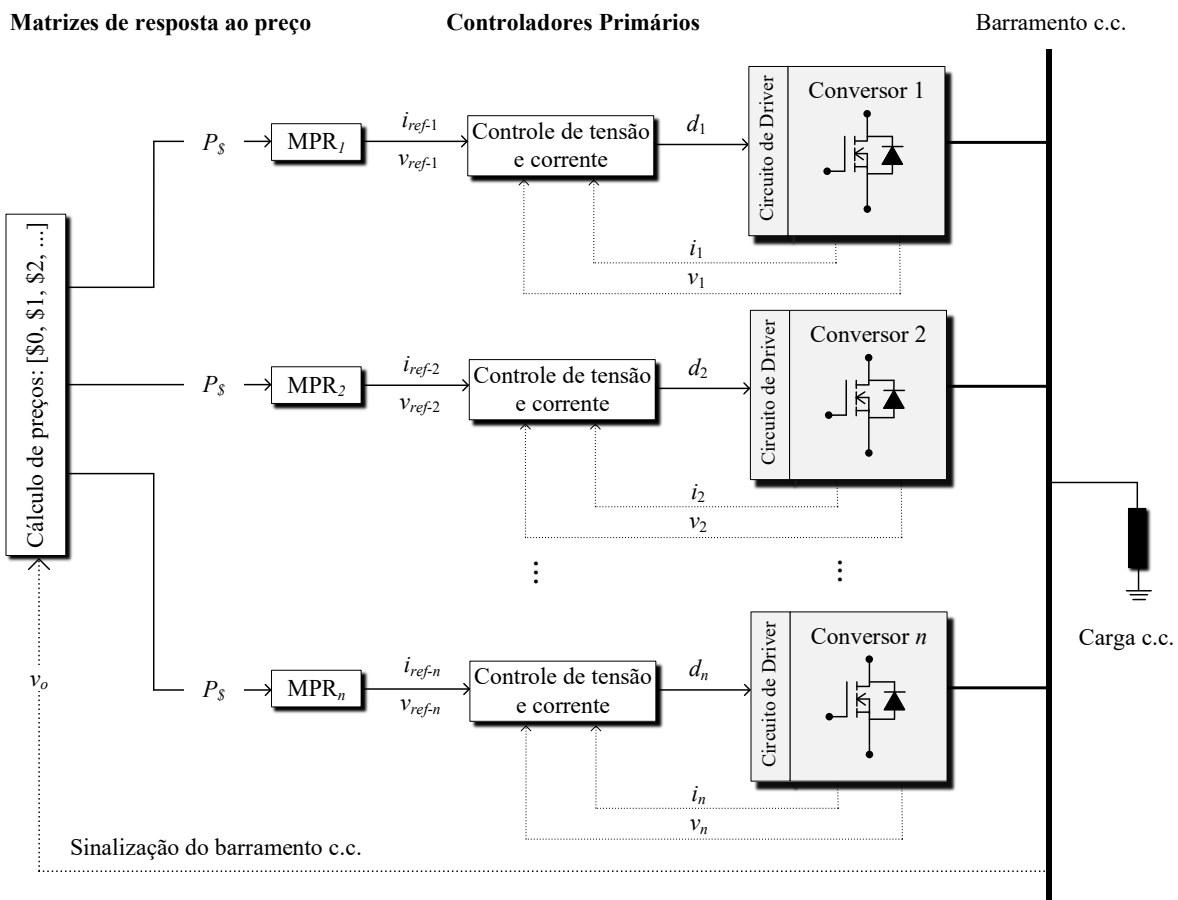
Para o gerenciamento de potência, cada elemento deve ter sua própria MRP, pré-definida. Entretanto, duas restrições devem ser consideradas para o projeto do gerenciador:

- A primeira restrição é que dois elementos diferentes não podem controlar a tensão do barramento c.c. ao mesmo tempo. Isso significa que os modos de operação (-1, 1) não podem ocorrer para diferentes elementos a um mesmo preço interno. O resultado é que o projeto do gerenciamento deve considerar todos os elementos da nanorede. Isso significa que para adicionar novos elementos, o gerenciador deve ser totalmente reprojado.

- ii. A segunda restrição é que a hipótese inicial das MRPs considera que todos os elementos interagem por meio de um único barramento c.c. centralizado. Isso significa que, atuando de maneira centralizada, não é possível gerenciar sistemas interconectados.

Em relação a implementação do sistema de controle, o gerenciamento de potência baseado em MRPs é representado na Figura 2.14.

Figura 2.14 – Estrutura de controle centralizada, considerando matrizes de resposta ao preço (MRPs) e sinalização do barramento c.c..



Fonte: adaptado de Bellinaso *et al.* (2021).

Apesar de que as MRPs aumentam parcialmente a flexibilidade de projeto do gerenciador, algumas desvantagens ainda devem ser superadas, porque limitações inerentes as máquinas de estados ainda são encontradas nesta solução. O principal limitante é que para o gerenciamento de potência as MRPs não podem ser dimensionadas individualmente para cada elemento de potência. Além disso, o desempenho do gerenciamento depende de um *link* de comunicação com alta largura de banda, para a comunicação do preço instantâneo aos



elementos (BELLINASO *et al.*, 2021), (CARVALHO *et al.*, 2021a). O resultado é que a proposta original de MRPs é limitada à sistemas centralizados, e com um único barramento c.c., que não demandam um grande número de elementos, ou uma estrutura de comunicação complexa. Adicionalmente, assim como máquinas de estados convencionais, as MRPs são sensíveis a erros de medidas e falhas de comunicação, o que não é um problema em abordagens com controladores *droop*.

Apesar de que controladores *droop*, podem ser facilmente adaptados para sistemas com múltiplos barramentos, devido a robustez de operação e funcionalidade *plug-and-play*, a efetividade para o gerenciamento de potência e priorização de elementos, é reduzida em função do gerenciamento baseado em compartilhamento de potência. Na sequência do trabalho, o Capítulo 3 aborda a estratégia de gerenciamento de potência proposta para superar tais limitações, incluindo MRPs e o gerenciamento de nanorredes com barramentos interconectados.

## 2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo, as estruturas de controle e gerenciamento de potência foram abordadas para contextualizar a proposta da tese. As principais abordagens da literatura atual incluem máquinas de estado e sinalização de tensão no barramento c.c., controladores *droop*, *droop* adaptativo e controladores hierárquicos. Por outro lado, à medida que o sistema aumenta, as estratégias de controle tornam-se complexas e pouco eficientes, porque os algoritmos de gerenciamento de potência precisam abordar vários aspectos, incluindo a demanda e prioridade de cargas, boa regulação de tensão e limitações de potência entre geradores distribuídos. Isso indica que ainda falta um método abrangente para as questões de gerenciamento de potência em nanorredes. Na sequência do trabalho é apresentada a proposta de gerenciamento de potência, baseada em controle *droop* e em matrizes de resposta ao preço.



### 3 GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA BASEADO EM RESPOSTA AO PREÇO

Como visto no Capítulo 2, para sistemas com múltiplos barramentos, as técnicas de gerenciamento de potência existentes não são efetivas. Mesmo as MRPs apresentam limitações, porque são baseadas em uma estrutura de controle centralizada, e apresentam uma restrição de controle de tensão. Neste capítulo é apresentada uma nova estrutura de gerenciamento de potência para sistemas com múltiplos barramentos e conversores *interlink*. Nesta tese, cada subsistema formado por um barramento c.c. e seus respectivos elementos de potência, é controlado de forma independente, atuando com seu próprio gerenciador de potência. Para aplicar a teoria de preços à sistemas interconectados e com múltiplos barramentos, é proposta a formação de um preço diferente para cada barramento da nanorede. Isso resultada em diferentes níveis de descentralização, porque o gerenciamento de potência é implementado de forma distribuída.

Além disso, são analisadas malhas de controle para o compartilhamento de potência, associando controladores *droop* às matrizes de resposta ao preço (MRPs). As MRPs são aplicadas como uma forma de adaptar o nível secundário de controle/gerenciamento as prioridades de cada elemento, assim como o custo de produção das fontes e valor das cargas. Adicionalmente, as malhas de compartilhamento de potência são utilizadas a nível primário pra que não se tenha restrições de controle em relação à tensão do barramento c.c.. Isso permite que o projeto do gerenciador seja realizado de forma individual para cada elemento de potência. A principal contribuição é que novos elementos podem ser adicionados ao sistema, sem que todo o gerenciador precise ser reprojetoado. Para isso é necessário definir um ganho de decaimento e uma matriz de resposta ao preço para cada elemento da nanorede, enquanto um vetor de preços é pré-determinado para cada barramento interconectado.

#### 3.1 INTRODUÇÃO AO GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA BASEADO EM PREÇOS

Neste trabalho, o preço interno trata-se de uma variável de controle utilizada para definir os modos de operação de cada elemento de potência. Para o gerenciamento, nenhuma referência de potência é definida porque o equilíbrio é alcançado em resposta ao preço. Isso significa que a formação de preços deve incentivar ou restringir o consumo de acordo com a disponibilidade de energia à nanorede. A ideia principal deste trabalho, é que um preço interno diferente deve

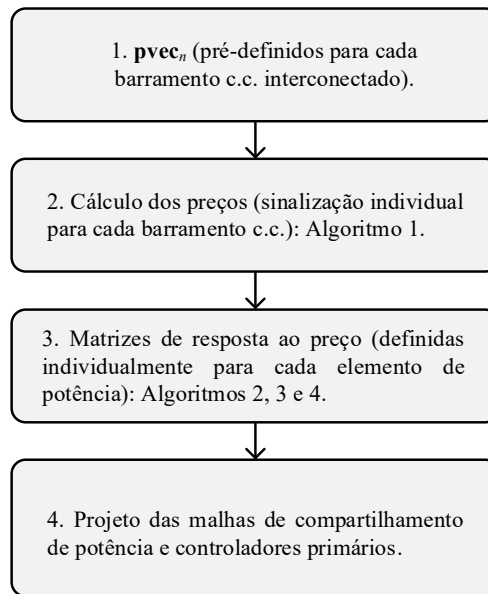
ser calculado para cada barramento interconectado, e para cada elemento de potência deve ser definida uma MRP.

Os preços internos devem ser organizados em ordem crescente em um vetor de preços, denominado **pvec**. Para cada barramento c.c. de índice  $n$  é definido um vetor **pvec<sub>n</sub>**. Na sequência do trabalho será apresentada a teoria de preços e como ela é aplicada ao gerenciamento de potência. As seções seguintes, são organizadas na ordem lógica de operação do gerenciador, incluindo detalhes dos seguintes passos:

1. Definição do vetor **pvec**: para cada barramento c.c. deve ser pré-definido um vetor de preços **pvec**. O vetor **pvec** contém um conjunto de preços, necessários para caracterizar o gerenciamento de potência. Os preços internos são representados por números inteiros [\$0, \$1, \$2, ...]. O método de dimensionamento do vetor **pvec** é apresentado em detalhes em Bellinaso (2017). Aqui é considerado que os vetores **pvec** são conhecidos e pré-determinados, porque a parametrização de preços (gerenciamento de energia), não está inclusa nos objetivos da tese.
2. Cálculo dos preços: o vetor **pvec<sub>n</sub>** é necessário para acessar o preço atual, sinalizado pelo barramento c.c. de índice  $n$ . A metodologia de cálculo de preços e de sinalização do barramento c.c. é apresentada em detalhes na seção 3.2, e sintetizada pelo Algoritmo 1.
3. Definição das matrizes de resposta ao preço (MRPs): para cada elemento de potência é definida uma MRP. Uma MRP é uma matriz que contém todos os modos de operação de um determinado elemento de potência. As MRPs são utilizadas para acessar os modos de operação, em resposta a um determinado preço. Na seção 3.3 é apresentada a metodologia e os algoritmos de cálculo das MRPs.
4. Projeto das malhas de compartilhamento de potência: para cada elemento de potência é necessário definir um coeficiente de decaimento ( $m$ ). As malhas de compartilhamento de potência são necessárias para superar restrições de controle de tensão, que originalmente estão previstas na metodologia de cálculo das MRPs. A análise das malhas de compartilhamento de potência é apresentada na seção 3.4.

As principais etapas de operação do gerenciamento de potência proposto são ilustradas na Figura 3.1, divididas de acordo seus respectivos níveis hierárquicos. Neste trabalho, o gerenciamento de potência é implementado de forma distribuída. A estrutura de controle é apresentada em detalhes na seção 3.5, após o desenvolvimento das etapas de projeto e operação do gerenciador, contidas na sequência.

Figura 3.1 – Organização hierárquica do gerenciamento de potência baseado em resposta ao preço.



Fonte: autoria própria.

### 3.2 METODOLOGIA DE CÁLCULO DOS PREÇOS

A etapa inicial de projeto consiste em estipular um preço interno para a energia disponível em um determinado barramento c.c. (CARVALHO *et al.*, 2021a). Considerando que o vetor  $\mathbf{pvec}_n$  é conhecido e pré-determinado, a sinalização do barramento c.c. de índice  $n$  é necessária para acessar o preço interno, contido em  $\mathbf{pvec}_n$ . Diferentes métodos são possíveis para a sinalização do barramento c.c., entretanto, definir tensões de comparação é uma forma simples de indexar o preço à escassez de energia. Considerando tensões de comparação, o cálculo dos preços é definido de acordo com a metodologia apresentada:

- i.* Inicialmente devem ser definidas tensões de comparação para o barramento c.c., sendo elas limites superiores ( $v_{s1}, v_{s2}, v_{s3}, \dots, v_{sn}$ ) e inferiores ( $v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{in}$ ) à tensão de referência  $v_{cc}^*$ ;
- ii.* A variável  $e[n]$  é um número inteiro que representa o índice de escassez da energia;
- iii.* Toda vez que a tensão do barramento c.c. cruza um limite de comparação superior na amostra  $n$ , é reduzido de  $e[n]$  uma unidade (-1);

- iv. Caso a tensão do barramento cruze um limite inferior, é atribuído à  $e[n]$  uma unidade (+1);
- v.  $e[n]$  igual a zero significa dizer que há equilíbrio de potência na tensão nominal do barramento c.c.;
- vi. As tensões de comparação devem ser definidas como valores discretos para que a escassez  $e[n]$  também seja um valor discreto;
- vii. Entre tensões de comparação, há uma faixa de histerese onde o índice  $e[n]$  não muda. Isso permite que não ocorram mudanças indesejadas no preço, devido a erros de medida ou perturbações indevidas na tensão do barramento.

Como resultado dos pressupostos (i-vii), o índice de escassez  $e[n]$ , na amostra  $n$ , é definido por (3.1).

$$e[n] = \begin{cases} -n & , & v_{sn} \leq v_{cc}[n] \\ \vdots & , & \vdots \\ -2 & , & v_{s2} \leq v_{cc}[n] \leq v_{s3} \\ -1 & , & v_{s1} \leq v_{cc}[n] \leq v_{s2} \\ 0 & , & v_{i1} \leq v_{cc}[n] \leq v_{s1} \\ +1 & , & v_{i2} \leq v_{cc}[n] \leq v_{i1} \\ +2 & , & v_{i3} \leq v_{cc}[n] \leq v_{i2} \\ \vdots & , & \vdots \\ +n & , & v_{cc}[n] \leq v_{in} \end{cases} \quad (3.1)$$

Após definir o índice de escassez  $e[n]$ , é necessário atribuir à energia o preço propriamente dito. A variável preço nada mais é do que um valor fictício e não está relacionado com o preço real da energia, por este motivo é denominado preço interno. Diferentemente do mercado econômico real, onde o preço pode ser representado por qualquer número real, nesta proposta, o preço interno é definido por valores discretos. Isso permite que as variações de preço sejam estipuladas de maneira semelhante as variações de escassez, somando ou subtraindo do preço atual, uma unidade.

Toda vez que a tensão do barramento cruza um limite inferior ( $v_{i1}, v_{i2}, \dots$ ), o índice de escassez é aumentado. Por isso, o preço interno deve ser aumentado em uma unidade (\$1). Quando a tensão do barramento eleva e cruza um limite superior ( $v_{s1}, v_{s2}, \dots$ ), o índice de escassez é reduzido e o preço também deve ser reduzido. O preço interno ( $P_s$ ) é definido pela expressão

$$P_s[n] = P_s[n-1] + \delta_P[n] \quad (3.2)$$

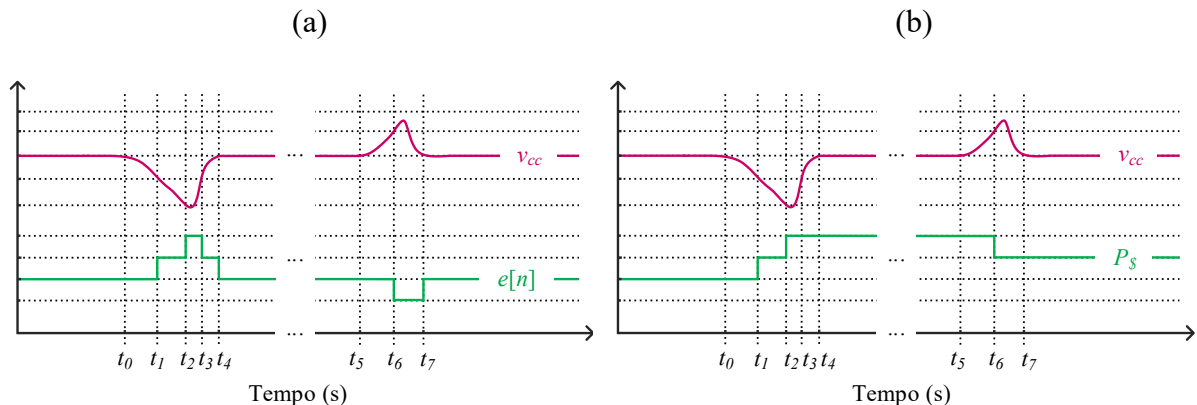
sendo que a variável  $\delta p[n]$  representa a variação do preço interno.

Para evitar mudanças indevidas de preço, a variável  $\delta p[n]$  deve ser atualizada somente se: *i*) houver cruzamentos de tensão por um limite de comparação superior na direção crescente; ou *ii*) se houver cruzamentos de tensão por um limite de comparação inferior na direção decrescente. Quando  $v_{cc}$  cruza uma tensão de comparação superior na direção decrescente, ou inferior na direção crescente não há mudanças de preço. Como consequência  $\delta p[n]$  é definido pela condição

$$\delta p[n] = \begin{cases} -1 & \Delta e[n] < 0 \text{ e } e[n] < 0 \\ 0 & \Delta e[n] = 0 \text{ ou } e[n] = 0 \\ +1 & \Delta e[n] > 0 \text{ e } e[n] > 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

onde,  $\Delta e[n] = e[n] - e[n-1]$ . Na Figura 3.2 são apresentadas as variações de preço considerando o índice de escassez de energia  $e[n]$  e sinalização do barramento c.c..

Figura 3.2 – Evolução de preços na nanorrede considerando o índice de escassez e variações de tensão no barramento c.c.: (a) variação do índice de escassez; (b) variação de preços.



Fonte: autoria própria.

Em relação as tensões de comparação, os limites devem ser definidos de acordo com a capacitância do barramento c.c. e resposta dos controladores de tensão. Na subseção seguinte, é apresentada a metodologia para definir as tensões de comparação.

### 3.2.1 Determinação das tensões de comparação para sinalização dos barramentos

O número de valores de tensões de comparação é definido de acordo com o vetor de preços necessário para gerenciamento de potência. O número de preços é proporcional ao

número de elementos da nanorede. Entretanto, a definição exata dos preços será abordada na subseção (3.3). Nesta subseção, é de interesse apenas os limites de preço máximo ( $P_{\$max}$ ) e preço mínimo ( $P_{\$min}$ ). O número máximo de preços deve ser igual ao número de tensões de comparação superiores e ao número de tensões inferiores. Isso permite que variações negativas ou positivas de tensão caracterizem todos os preços possíveis da seguinte forma:

- i. Em um único afundamento de tensão, deve ser possível que o preço varie do valor mínimo ( $P_{\$min}$ ) para valor máximo ( $P_{\$max}$ ) cruzando todas as tensões de comparação inferiores a referência;
- ii. Em uma única elevação de tensão, deve ser possível que o preço varie do valor máximo ( $P_{\$max}$ ) para o valor mínimo ( $P_{\$min}$ ), cruzando todas as tensões de comparação superiores a referência.

Considerando os pressupostos (i-ii), o número de tensões de comparação superiores, juntamente com as inferiores a tensão de referência  $v_{cc}$  é igual a:

$$i = 2 \cdot (P_{\$max} - P_{\$min}) \quad (3.4)$$

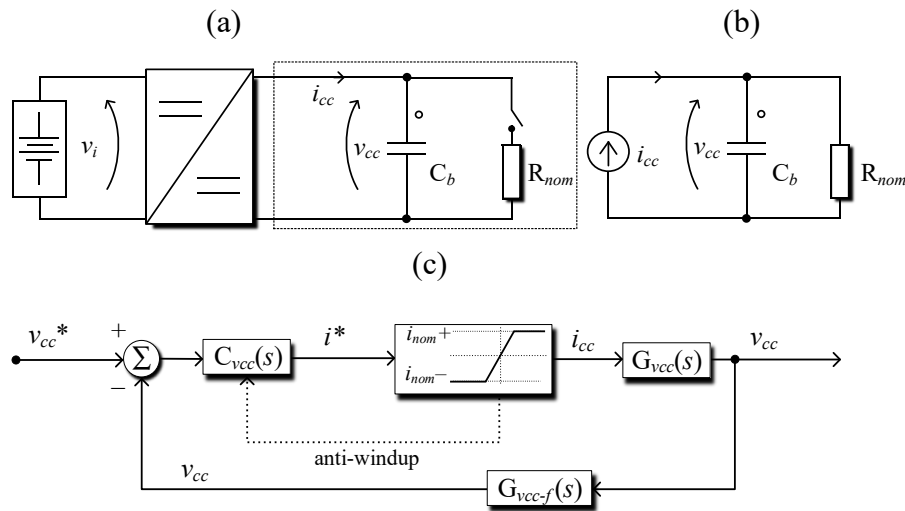
Caso o preço varie de \$-1 a \$7 por exemplo, serão necessárias 16 tensões de comparação, sendo 8 limites de comparação positivos e 8 limites de comparação negativos, de acordo com (3.4). As escolhas das tensões de comparação dependem de dois aspectos principais: a capacitância do barramento c.c. e desempenho transitório dos controladores de tensão. Quanto maior a capacitância do barramento, e mais rápida a resposta transitória dos controladores, menores serão as variações de tensão permitidas ao barramento c.c. (BELLINASO, 2017), (BELLINASO *et al.*, 2021). Como metodologia de projeto, ensaios de variação de carga e de inicialização do sistema são propostos na sequência para definir as tensões de comparação.

### 3.2.1.1 Resposta do barramento c.c. para distúrbios de carga

Para analisar afundamentos e elevações de tensão, uma carga referente a potência nominal ( $R_{nom.}$ ) da nanorede é conectada ao barramento c.c.. Em regime permanente, o desligamento da carga resulta em sobretensões enquanto a reconexão resulta em variações negativas. A máxima variação de tensão é adotada como indicativo inicial para as tensões de comparação. Na Figura 3.3 é apresentado de maneira genérica, o sistema de controle considerado para determinar as tensões de comparação.



Figura 3.3 – Sistema de controle de tensão do barramento c.c. para determinação as tensões de comparação: (a) circuito de potência; (b) circuito equivalente para modelagem do barramento c.c.; (c) diagrama de controle.



Fonte: autoria própria.

*a. Condições de teste para elevações de tensão*

- i. O barramento c.c. inicia com tensão constante e igual à referência  $v_{cc}^*$ ;
- ii. O controlador de tensão do barramento ( $C_{vcc}$ ) deve estar habilitado com ação de controle igual à corrente nominal  $i_{cc}$ ;
- iii. A carga  $R_{nom}$  é conectada ao barramento e tem valor igual a  $v_{cc}/i_{cc}$ ;
- iv. Em regime permanente, a carga deve ser desligada para que a tensão do barramento se eleve até o valor máximo de sobre-elevação.

*b. Condições de teste para os afundamentos de tensão*

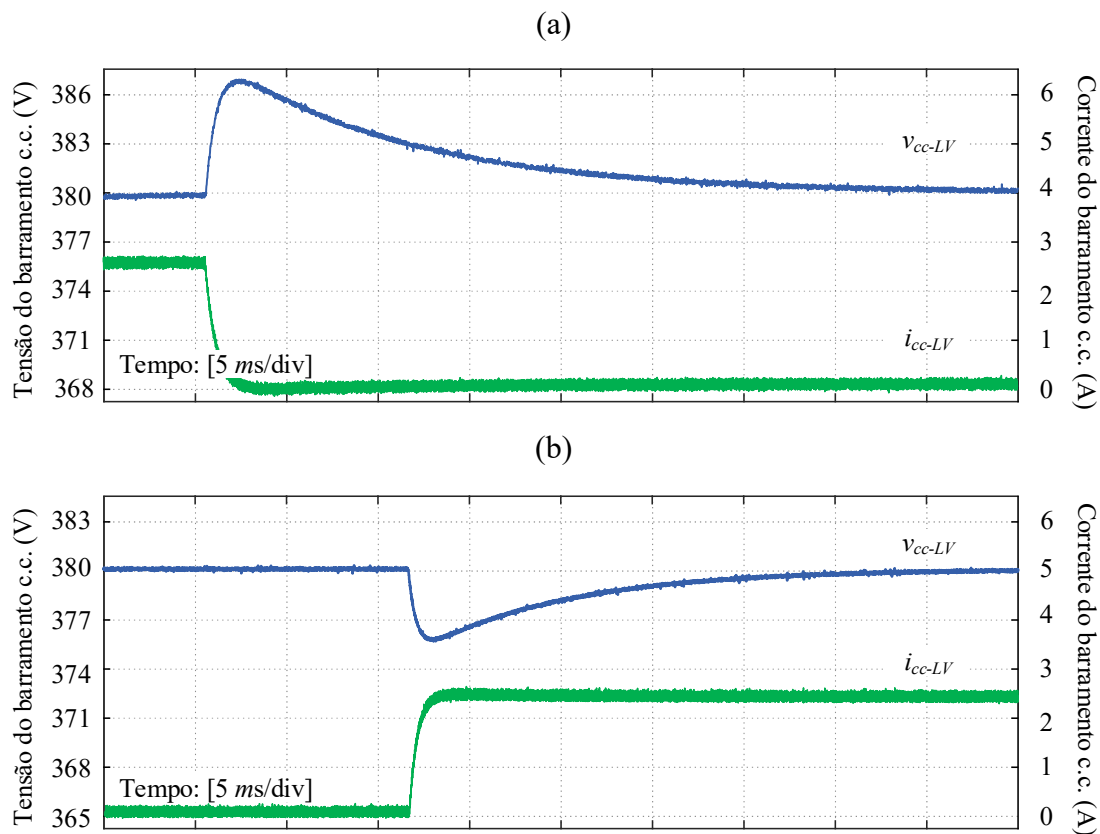
- i. Para o teste de afundamento de tensão, o barramento c.c. apresenta tensão constante e igual à referência  $v_{cc}^*$ ;
- ii. O controlador de tensão ( $C_{vcc}$ ) deve estar habilitado com ação de controle igual a zero, porque nenhuma carga está conectada ao barramento;
- iii. Em regime permanente, a carga deve ser reconectada para que a tensão do barramento reduza até o valor máximo de afundamento.

Para ilustrar os ensaios de variação de tensão é utilizada a plataforma Typhoon-HIL 602+. A plataforma permite realizar simulações em tempo real, considerando os parâmetros da nanorrede dimensionada no Capítulo 4. Para a implementação dos controladores de tensão e corrente foi utilizado o processador digital de sinais TMSF28379D, do fabricante *Texas*

*Instruments.* Os principais parâmetros da nanorrede em LVDC são apresentados no Apêndice A. Inicialmente, o barramento em LVDC é considerado. O capacitor de barramento ( $C_B$ ) é igual a 2,7 mF e a potência nominal da carga é igual a 1 kW. A tensão nominal do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ) é igual a 380 V. O último elemento de interesse é o controlador de tensão, especificado de maneira genérica pela frequência de corte igual a 24 Hz.

Na Figura 3.4 são apresentados os resultados de simulação. No primeiro ensaio, a carga de 1 kW é desconectada do barramento. Neste instante, a tensão  $v_{cc-LV}$  sofre uma sobre-elevação transitória de, aproximadamente, 6,5 V conforme mostra a Figura 3.4(a). Após o barramento ser novamente regulado em 380 V, a carga é reconectada para verificar a resposta transitória do sistema de controle. Neste ensaio, são verificados aproximadamente 6,0 V de variação negativa de tensão como ilustra a Figura 3.4(b).

Figura 3.4 – Resultados de simulação para a resposta transitória de controle do barramento c.c. (a) elevação de tensão por desconexão de carga; (b) afundamento de tensão por conexão de carga.



### 3.2.1.2 Resposta do barramento c.c. para a inicialização do sistema

O segundo teste consiste em analisar a elevação de tensão para a inicialização do sistema em duas condições: a) ensaio de sobre-elevação e b) ensaio de variação negativa de tensão.

#### a. Inicialização do sistema com tensão inicial reduzida

- i. O sistema deve apresentar como condição inicial o nível de tensão mínimo possível ao barramento c.c.;
- ii. O controlador de tensão deve estar habilitado com ação de controle igual à corrente nominal  $i_{nom}$ ;
- iii. A tensão do barramento c.c. é elevada até que o controlador volte a regular o barramento em seu valor de referência  $v_{cc}$  (380 V);
- iv. O máximo valor de tensão corresponde a sobre-elevação de tensão para a inicialização do sistema.

#### b. Inicialização do sistema com tensão elevada

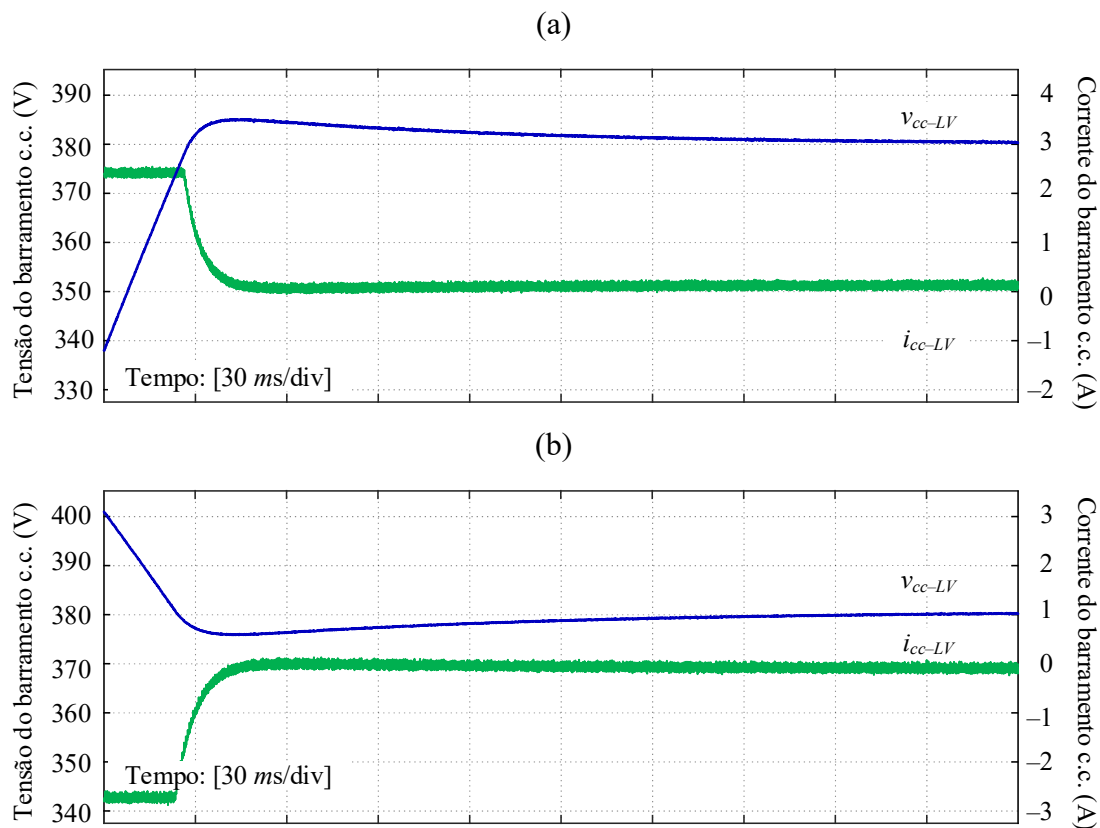
- i. Para o teste de afundamento de tensão o barramento c.c. deve iniciar com tensão superior à referência  $v_{cc}$ ;
- ii. O controlador de tensão é habilitado com ação de controle igual à  $-i_{nom}$ ;
- iii. A tensão do barramento c.c. deve ser reduzida até que o controlador volte a regular o barramento em seu valor de referência  $v_{cc}$  (380 V);
- iv. O valor mínimo de tensão corresponde ao afundamento de tensão para a inicialização do sistema.

Na Figura 3.5 são apresentados os resultados de simulação em tempo real. Para a inicialização do sistema, como mostra a Figura 3.5(a), é verificada uma sobre-elevação de aproximadamente 6,0 V e, de acordo com a Figura 3.5(b) um afundamento de 4,0 V. O valor pré-escolhido deve ser a máxima variação de tensão para os testes (a) e (b), ou seja, 6,0 V.

### 3.2.1.3 Escolha das tensões de comparação

Os ensaios (3.1.1.1) e (3.1.1.2) são utilizados para verificar a máxima variação de tensão ( $\Delta V$ ) resultante dos controladores primários. Para a sinalização do barramento c.c., as tensões de comparação são escolhidas a um passo igual  $\Delta V$ , adicionada uma margem de segurança.

Figura 3.5 – Resultados de simulação para a inicialização do sistema: (a) inicialização do sistema para o teste de sobre-elevação; (b) inicialização do sistema para o teste de variação negativa de tensão.



Fonte: autoria própria.

Inicialmente, para os testes de variação de carga, a máxima variação de tensão é igual a 6,5 V. Para a inicialização do sistema 6,0 V foram verificados no teste de sobre-elevação. Desta forma,  $\Delta V$  deve ser igual a 6,5 V. Adotando uma margem de segurança de 1,5 V, o resultado é que as tensões de comparação variam a passo de 8 V, ou seja [..., 372 V, 380 V, 388 V, ...].

Para o barramento c.c. em extra-baixa tensão, o mesmo procedimento de ensaios foi realizado, resultando em um passo de 1 V para as tensões de comparação, definidas como [..., 47 V, 48 V, 49 V, ...].

### 3.2.2 Síntese do método de cálculo de preços

Considerando que as tensões de comparação ( $\Delta v$ ) devem ser valores pré-definidos, o método de cálculo de preços para um sistema qualquer segue a relações definidas pelo conjunto

equações (3.1), (3.2) e (3.3). Para permitir a implementação de preços em um controlador digital de sinais ou microprocessador, o cálculo de preços é sintetizado no Algoritmo 1.

---

**Algoritmo 1:** Cálculo dos preços

---

```

1.  SE  $v_{cc} > v_{cc}^* + \Delta v$ , então
2.  |    $P^+ = 0$ ;
3.  |    $P^- = 1$ ; habilita redução de preços
4.  Fim
5.  SE  $v_{cc} < v_{cc}^* - \Delta v$ , então
6.  |    $P^+ = 1$ ; habilita aumento de preços
7.  |    $P^- = 0$ ;
8.  Fim
9.  SE  $P^- == 1$ , então
10. |   SE  $v_{cc}[0] - v_{cc}[1] \geq \Delta v$ , então
11. |   |    $e[0] = e[0] - 1$ ;
12. |   |    $\Delta e = e[0] - e[1]$ ;
13. |   |   SE  $\Delta e < 0$ , então
14. |   |   |    $\delta_P = -1$ ;
15. |   |   |    $P_S = P_S + \delta_P$ ;
16. |   |   |    $e[1] = e[0]$ ;
17. |   |   Fim
18. |   |    $v_{cc}[1] = v_{cc}[0]$ ;
19. |   Fim
20. |   SE  $v_{cc}[0] - v_{cc}[1] < \Delta v$ , então
21. |   |    $e[0] = e[0] + 1$ ;
22. |   |    $v_{cc}[1] = v_{cc}[0]$ ;
23. |   Fim
24. Fim
25. SE  $P^+ == 1$ , então
26. |   SE  $v_{cc}[0] - v_{cc}[1] \leq \Delta v$ , então
27. |   |    $e[0] = e[0] + 1$ ;
28. |   |    $\Delta e = e[0] - e[1]$ ;
29. |   |   SE  $\Delta e > 0$ , então
30. |   |   |    $\delta_P = 1$ ;
31. |   |   |    $P_S = P_S + \delta_P$ ;
32. |   |   |    $e[1] = e[0]$ ;
33. |   |   Fim
34. |   |    $v_{cc}[1] = v_{cc}[0]$ ;
35. |   Fim
36. |   SE  $v_{cc}[0] - v_{cc}[1] < \Delta v$ , então
37. |   |    $e[0] = e[0] - 1$ ;
38. |   |    $v_{cc}[1] = v_{cc}[0]$ ;
39. |   Fim
40. Fim

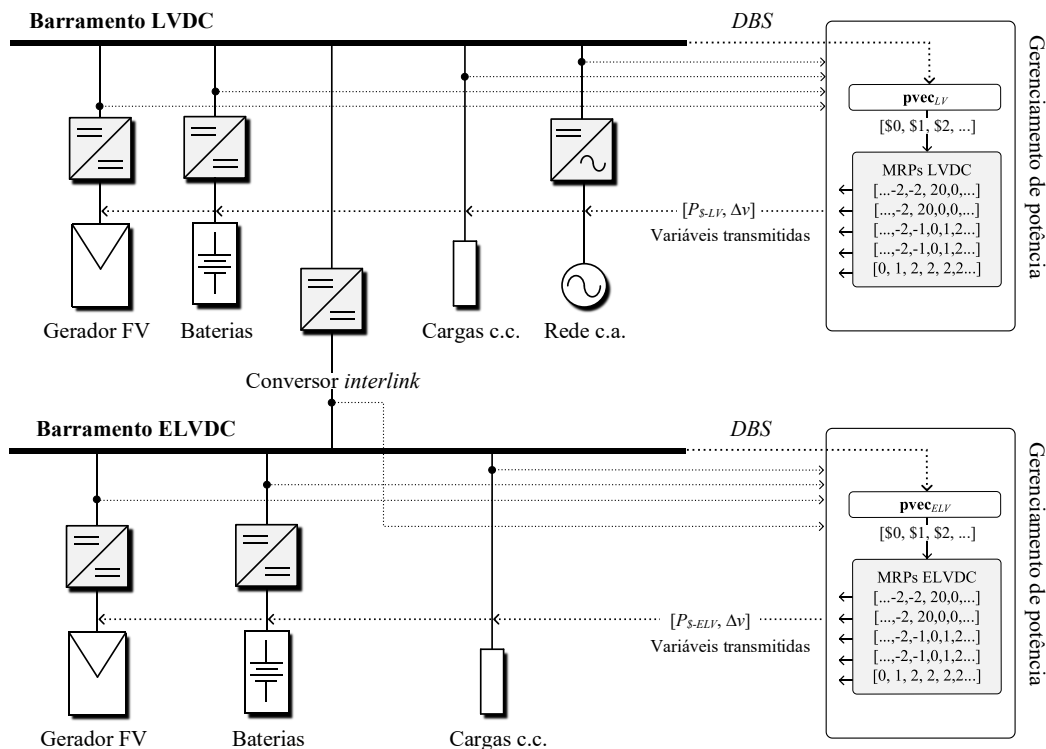
```

---

### 3.3 PROPOSTA DA ESTRATÉGIA DE GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA

Nesta seção, será apresentado o sistema de gerenciamento de potência. Para isso é necessário relacionar os modos de operação dos conversores com a ideia fundamental de preços. O preço interno é uma variável inteira  $[\$0, \$1, \$2\dots]$  atribuídos as colunas de um vetor  $\mathbf{pvec}$ . Esse preço não está exatamente relacionado com o preço real da energia. Entretanto, é utilizado como uma variável de controle, que define as relações de compra e venda entre os próprios elementos da nanorrede. Na Figura 3.6, é apresentada de maneira genérica a estrutura de controle da nanorrede, incluindo geradores distribuídos, bancos de baterias, cargas e dois barramentos interconectados. O projeto detalhado da nanorrede é apresentado no Capítulo 4. Neste diagrama, é apenas considerada a integração dos elementos com o cálculo do preço interno, onde o preço é comunicado a todos os elementos como uma variável de controle utilizada para alterar os modos de operação  $(-2, -1, 0, 1, 2)$ .

Figura 3.6 – Diagrama geral da nanorrede e gerenciamento de potência baseado preços.



Fonte: autoria própria.

Nas camadas inferiores de controle, cada conversor interage com o preço de maneira independente. Nesta proposta, nenhuma referência de potência é definida, porque o

balanceamento de potência é alcançado em resposta ao preço. De acordo com os modos de operação dos conversores, um ou mais elementos controladores são definidos para regular a tensão do barramento c.c.. Quando uma saturação de potência ocorre nos controladores de tensão, a sinalização de tensão deve indicar uma mudança de preços, sinalizando para o gerenciador uma mudança de estado, onde novos elementos devem ser definidos como controladores de tensão.

Para permitir que mais de um elemento atue como controlador de tensão em um mesmo preço, uma malha adicional de compartilhamento de potência deve ser prevista. Devido aos erros de tensão resultantes dos controladores *droop*, é proposta a utilização de um controle *droop* hierárquico. Por isso, além dos preços ( $P_{s-n}$ ), o desvio de tensão ( $\Delta v$ ) deve ser informado aos controladores primários.

Nesta proposta, cada conversor tem sua própria MRP e cada subsistema (LVDC e ELVDC) é gerenciado de forma independente. Isso significa que um conjunto de MRPs é dimensionado para cada subsistema da nanorrede. Os modos de operação dos conversores são acessados nas MRPs em função do preço sinalizado em cada barramento. Desta forma, diferentes preços são formados para cada subsistema interconectado. Para isso, o gerenciamento de potência é implementado de forma distribuída, sendo esta, uma das principais contribuições do trabalho.

### 3.3.1 Classificação dos elementos da nanorrede e modos de operação

Para o controle da nanorrede, o equilíbrio de potência deve ser alcançado através da automação dos modos de operação dos conversores. Os números (-2, -1, 0, 1, 2) são utilizados para sinalizar os modos de operação, onde o sinal indica absorção (-) ou injeção (+) de potência no barramento c.c.. De maneira genérica, os elementos da nanorrede podem ser classificados de acordo com a sua forma de interação com o barramento c.c., sendo eles:

- a) **Reguladores lineares:** possuem a capacidade de controlar a tensão do barramento c.c. em um valor específico, que corresponde aos valores de referência de cada barramento (48V para barramentos em ELVDC e 380 V para LVDC).
- b) **Elementos não-reguladores:** não podem controlar a tensão do barramento, porque atuam apenas ligados ou desligados.

Além disso, de acordo com o fluxo de potência, os elementos podem ser classificados em:

- a) **Fontes unidirecionais:** fornecem energia positiva ao barramento c.c., portanto, podem atuar em três modos de operação distintos: (0) desligadas, (1) com controle de tensão no barramento c.c., e (2) sem regulação do barramento c.c.;
- b) **Cargas:** demandam energia do barramento c.c., resultando em fluxo negativo de potência. As cargas podem atuar em três possíveis modos de operação: (0) desligadas, (-1) ligadas com controle de tensão do barramento c.c. e (-2) sem regulação do barramento.
- c) **Elementos bidirecionais:** podem atuar como fontes ou cargas, portanto, atuam com cinco possíveis modos de operação, (-2, -1, 0, 1, 2). Exemplos de elementos bidirecionais são os bancos de baterias e sistemas de armazenamento de energia. A rede elétrica também pode ser considerada como um elemento bidirecional, uma vez que o conversor c.c.-c.a. pode operar como inversor (carga) ou retificador (fonte para o barramento c.c.).

Tabela 3.1 – Exemplos de elementos de potência e sua interação com a nanorrede considerando o gerenciamento de potência baseado em preços.

<b>Elemento</b>	<b>Fluxo de potência</b>	<b>Regulação de tensão</b>	<b>Modos de operação</b>
Iluminação LED	Carga	Não-Regulador	0 (desligado) / -2 (ligado)
Ar-condicionado	Carga	Regulador	0 (desligado) / -1 (controle de tensão) / -2 (condição nominal)
Cargas eletrônicas (TV, computadores, modems, etc)	Carga	Não-Regulador	0 (desligado) / -2 (condição nominal)
Gerador FV	Fonte	Regulador	0 (desligado) / 1 (controle de tensão) / 2 (SPMP)
Bancos de baterias	Bidirecional	Regulador	-2 (carga nominal) / -1-1 (controle de tensão) / 0 (desligado) / 2 (descarga nominal)
Rede elétrica c.a. (conversor c.c.-c.a.)	Bidirecional	Regulador	-2 (inversor) / -1-1 (controle de tensão) / 0 (desligado) / 2 (retificador)
Supercapacitor	Bidirecional	Não-Regulador	0 (desligado) / -2-2 (ligado)
Gerador diesel	Fonte	Regulador	0 (desligado) / 1 (controle de tensão) / 2 (condição nominal)



Para cada conversor é necessário definir modos de operação  $(-2, -1, 0, 1, 2)$ , de acordo com suas funcionalidades para a compatibilidade com a nanorrede. Para ilustrar essa aplicação, na Tabela 3.1, são apresentados diferentes elementos de potência e seus possíveis modos de operação. Um computador pessoal por exemplo, deve operar apenas ligado  $(-2)$  ou desligado  $(0)$ . Por outro lado, um aparelho de ar-condicionado ou iluminação com dimerização são aplicações que podem ser adaptadas para operar com potência limitada  $(-1)$ , caso necessário. Em relação a geração e elementos bidirecionais, fontes alternativas podem incluir células a combustível, bancos de baterias, supercapacitores e outros. Um gerador fotovoltaico pode atuar em SPMP  $(2)$ , com limitação de potência  $(1)$  e desligado  $(0)$ . Um supercapacitor por exemplo, pode ser conectado diretamente ao barramento c.c., esse é um elemento bidirecional, que não pode atuar como controlador de tensão. Por outro lado, um banco de baterias conectado à nanorrede por um conversor bidirecional pode atuar em todos os modos de operação, incluindo seus modos de carga  $(-2, -1)$ , descarga  $(1, 2)$  e desligado  $(0)$ .

Adicionalmente é importante citar que neste trabalho, os elementos de potência atuam com controle *droop* apenas nos modos  $(-1/1)$ . Desta forma é possível definir exatamente quando um elemento deve ser desligado  $(0)$  ou ligado em potência nominal  $(-2/2)$ , porque não é necessário a operação em compartilhamento de potência durante todo o tempo. Para a organização do sistema de controle, a metodologia de MRPs é apresentada em detalhes na sequência.

### 3.3.2 Matrizes de resposta ao preço (MRPs)

Uma MRP é uma matriz que relaciona os preços indexados no vetor **pvec** aos modos de operação dos conversores. Por exemplo, um gerador fotovoltaico pode ser representado por um MRP de uma única linha (vetor de resposta ao preço), em que cada coluna relaciona o modo de operação  $(0, 1, 2)$  a um preço diferente, como apresentado em (3.5).

$$\begin{aligned} \mathbf{pvec} &= [\$-1 \quad \$0 \quad \$1 \quad \$2 \quad \$3 \quad \$4 \quad \$5 \quad \$6 \quad \$7 \quad \$8] \\ \text{MPR}_{fv} &= [ \quad 0 \quad 1 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 ] \end{aligned} \quad (3.5)$$

O modo de operação do conversor é obtido acessando o índice da matriz relacionado ao preço atual. Neste caso, o conversor FV é desligado  $(0)$  com preço  $\$-1$ , controla a tensão do barramento  $(1)$  com preço  $\$0$  e atua em SPMP  $(2)$  quando o preço é igual ou superior a  $\$1$ . Aqui encontra-se uma motivação para a adoção de valores inteiros para o preço interno: é possível

utilizar o preço como o índice da MRP para a escolha direta do modo de operação dos conversores.

O segundo caso de interesse é quando a MRP apresenta mais do que uma linha. Isso ocorre quando o valor da energia de determinado elemento é variável ao longo do tempo, devido à escassez variável e necessidade de uso. Por exemplo, a energia de uma bateria descarregada tem maior valor do que a energia de uma bateria carregada, visto que é mais escassa e poderia ser utilizada somente para alimentar as cargas mais prioritárias. O resultado é que um sistema de armazenamento pode ter diferentes MRPs de acordo com o estado de carga das baterias. Em (3.6) é apresentado um exemplo que considera três condições de operação para as baterias: *i*) estado de carga alto; *ii*) estado de carga intermediário; e *iii*) baixo estado de carga.

$$\begin{aligned}
 \text{pvec} &= [ \$-1 \quad \$0 \quad \$1 \quad \$2 \quad \$3 \quad \$4 \quad \$5 \quad \$6 \quad \$7 \quad \$8 ] \\
 \text{SoC[alto]} &= [ -2 \quad -2 \quad -1 \quad 0 \quad 1 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 ] \\
 \text{MRP}_{bat} \text{ SoC[interm.]} &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -1 \quad 0 \quad 1 \quad 2 \quad 2 \quad 2 ] \\
 \text{SoC. [baixo]} &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -1 \quad 0 \quad 1 \quad 2 \quad 2 ]
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

De maneira genérica as condições de operação, relacionadas ao valor variável da energia, podem ser divididas em  $n$  parcelas, resultando em uma MRP com  $n$  linhas que correspondem a cada condição de operação de um determinado elemento. Em (3.7), essa relação é apresentada pela MRP ( $i$ ), onde o valor da energia é crescente no sentido da linha 1 para a linha  $n$ .

$$\begin{aligned}
 \text{pvec} &= [ \$-1 \quad \$0 \quad \$1 \quad \$2 \quad \$3 \quad \$4 \quad \$5 \quad \$6 \quad \dots \quad \$i ] \\
 1 &= [ -2 \quad -2 \quad -1 \quad 0 \quad 1 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad \dots \quad 2 ] \\
 \text{MRP} \quad \vdots &= [ \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \dots \quad \vdots ] \\
 n &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -1 \quad 0 \quad 1 \quad \dots \quad 2 ]
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Considerando (3.7), o número de condições de operação de um elemento corresponde ao número de linhas da sua MRP, enquanto o número de colunas é igual ao número de preços, necessários ao gerenciador de potência.

### 3.3.3 Metodologia de cálculo das MRPs.

Para a sequência da proposta, é necessário apresentar uma metodologia que permita determinar sistematicamente as matrizes de resposta ao preço. Com o objetivo de determinar as MRPs, o dimensionamento do gerenciador de potência é realizado em três etapas: *i*)

parametrização dos custos de energia das fontes e valor das cargas pelo usuário, de acordo com o vetor de preços **pvec**, pré-definido para cada barramento c.c.; *iii*) definição das dimensões das matrizes de resposta ao preço; e *iv*) preenchimento das matrizes com os modos de operação (-2, -1, 0, 1, 2).

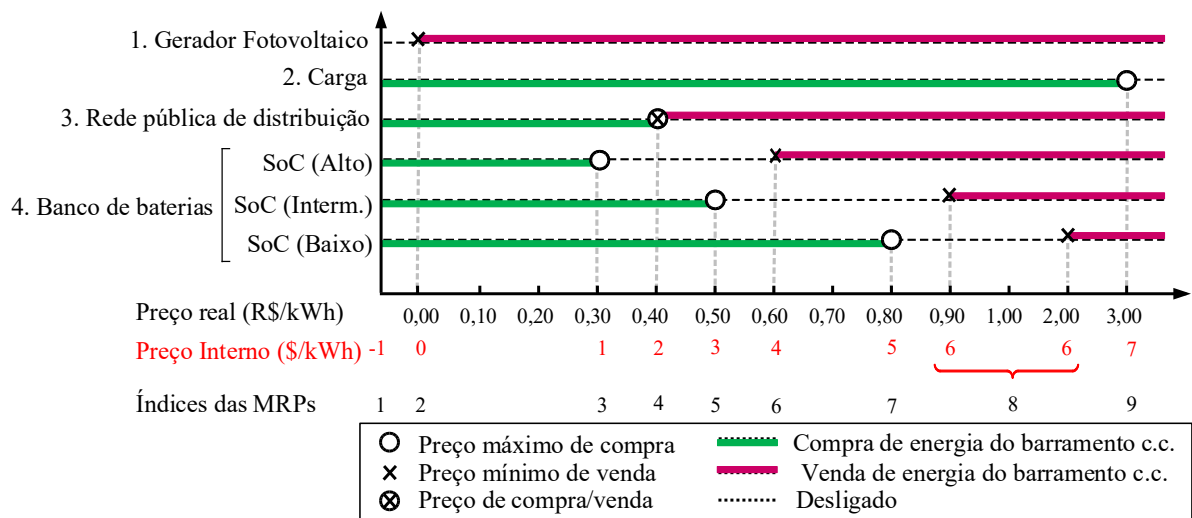
### 3.3.3.1 Parametrização de preços

A parametrização das MRPs diz respeito a definição de preferências como os preços máximos de compra para as cargas e preços mínimos de venda para as fontes:

- i.* Para as fontes: é necessário definir os valores limites mínimos de venda.
- ii.* Para as cargas: são definidos os valores máximos limites de compra de acordo com a prioridade das cargas, por exemplo, cargas de maior prioridade podem comprar energia com preços elevados se necessário, entretanto, cargas de menor prioridade pode ser desligadas quando o preço aumenta.

Estes dados podem ser tratados por um sistema supervisor e gerenciador de energia, ou fornecidos diretamente ao gerenciador de potência pelo usuário. Em Bellinaso *et al.* (2021), é apresentada uma metodologia que relaciona os preços reais com a formação do vetor de preços internos. Esta metodologia é exemplificada na Figura 3.7. Para cada preço real, relevante ao gerenciador, é atribuído um preço interno, representado por um valor inteiro.

Figura 3.7 – Gráfico de preços máximos e mínimos de compra e venda de energia, parametrizados pelo usuário.



Fonte: autoria própria.

O resultado é um vetor de preços **pvec** que representa todos os preços necessários ao gerenciamento de potência. Neste trabalho, é considerado que o vetor de preços é previamente conhecido e o sistema pode ser parametrizado diretamente através do vetor **pvec**.

O vetor **pvec**  $[1 \times i]$ , é um vetor linha de tamanho  $i$  que inclui todos os preços internos do barramento c.c. de índice  $n$  em ordem crescente. Para cada barramento c.c. adicionado à nanorrede, deve ser definido um vetor **pvec**, considerando que:

- i. O valor zero (\$0) deve corresponder ao valor zero real (R\$ 0);
- ii. O preço interno \$-1 é definido como uma medida de segurança para que todos os geradores sejam desligados, caso necessário.

O vetor **pvec** deve ser definido de acordo com os preços necessários ao gerenciador de potência e de acordo com o número de tensões de comparação permitidas ao barramento c.c.. O número máximo de preços deve ser igual ao número de tensões de comparação superiores e, também, ao número de tensões inferiores. Isso permite que variações negativas ou positivas de tensão caracterizem todos os preços possíveis ao vetor **pvec**. Em (3.8) é definido de maneira genérica, o vetor **pvec**  $[1 \times i]$ .

$$\mathbf{pvec} [1 \times i] = [ \$-1, \$0, \$1, \dots, \$P_{\$max-1}, \$P_{\$max} ] \quad (3.8)$$

Caso o preço varie de \$-1 a \$8 por exemplo, de acordo com (3.4) serão necessárias 18 tensões de comparação, sendo 9 limites de comparação positivos e 9 limites de comparação negativos. Isso significa que **pvec** pode ser escolhido em função da máxima variação de tensão permitida ao barramento c.c.. O limitante é que quanto maior o número de preços escolhidos para o gerenciamento, maiores serão as variações de tensão e vice e versa.

### 3.3.3.2 Definição das dimensões das matrizes de resposta ao preço

Cada elemento da nanorrede deve possuir sua própria matriz de resposta ao preço. O número de colunas é definido diretamente pelo número de preços. Isso significa que se o vetor **pvec** tem tamanho  $1 \times i$ , para  $i$  preços, todas as MRPs devem apresentar  $i$  colunas.

O número de linhas de cada MRP está relacionado ao número de condições de operação (OCs) de cada elemento. Por exemplo, se a rede elétrica é dividida em três condições de operação (cara, intermediária e barata), a MRP da rede deve apresentar três linhas. No exemplo da Figura 3.7, o gerador fotovoltaico apresenta uma única condição de operação, portanto, sua MRP apresenta uma única linha. Já para o caso das baterias, há três condições de operação

(relacionadas ao SoC) e sua MRP deve ter três linhas. De maneira generalizada uma MRP é uma matriz de dimensões [OCs x  $i$  ]

### 3.3.3.3 Preços de compra/venda e atribuição aos modos de operação

O preenchimento das MRPs deve conter as informações sobre os modos de operação de cada conversor considerando as condições de operação (linha) e vetor de preços (colunas). Os modos de operação possíveis aos conversores de potência são:  $(-2, -1, 0, 1, 2)$ . Esses números são atribuídos a cada célula de uma MRP em ordem crescente. Adicionalmente, dois casos especiais devem ser incluídos nas MRPs:

**11:** esse número significa que um elemento pode operar nos modos  $(-1)$  ou  $(+1)$  com um mesmo preço interno. Como por exemplo, o conversor c.c.-c.a. conectado à rede pode operar como inversor ou retificador controlando o barramento c.c., considerando que o preço máximo de compra e o preço mínimo de venda pode ser o mesmo.

**20:** esse número sinaliza o travamento de um modo de operação para cargas não-controladoras. Esse travamento é importante para evitar oscilações periódicas de preços.

A atribuição dos números dentro de uma MRP é feita para cada condição de operação de acordo com a parametrização do usuário. O método de parametrização é apresentado detalhadamente em Bellinaso *et al.* (2021). O primeiro número deve ser atribuído aos preços referentes ao limite mínimo de venda ( $P_{\$-min}$ ) ou máximo de compra ( $P_{\$-max}$ ).

Os modos de operação dos conversores nos limites de compra e venda dependem da classificação de cada elemento: *i*) reguladores lineares atribuem os números  $(-1)$  para ( $P_{\$-max}$ ) e  $(1)$  para ( $P_{\$-min}$ ). O número  $(11)$  é atribuído quando os preços limites de compra e venda são iguais ( $P_{\$-min}=P_{\$-max}$ ), possibilitando que um elemento bidirecional opere como fonte, ou carga, à um mesmo preço interno; *ii*) cargas não-reguladoras atribuem  $(20)$  para os preços limites de compra ( $P_{\$-max}$ ). Os modos de operação restantes são atribuídos as colunas das MRPs em ordem crescente, assim como ilustrado na Figura 3.8.

### 3.3.4 Síntese do método de cálculo das MRPs

O método de cálculo das MRPs apresentado na subseção 3.2.3 inicia com a definição do vetor de preços  $\mathbf{pvec}_n$  para o barramento c.c. de índice  $n$ , ao qual o elemento de potência está conectado. Após a definição de  $\mathbf{pvec}_n$  [ $1 \times i$ ], as matrizes de resposta ao preço devem ser

dimensionadas para cada elemento de potência do barramento  $n$ . Na sequência serão apresentados os algoritmos de cálculo das MRPs para cada tipo de elemento da nanorrede.

Figura 3.8 – Preenchimento das MRPs para os principais elementos da nanorrede.

<b>Elementos controladores</b>										
Sistema FV										
		0	1	2	2	2	2	...		
Armazenamento de energia										
...	-2	-2	...	-2	-2	-1	0	1	2	2 2 ... <span style="border: 1px solid black;">2</span> <span style="border: 1px solid black;">2</span> ...
Rede pública de distribuição										
...	-2	-2	...	-2	-2	-2	-1	0	1	2 2 ... <span style="border: 1px solid black;">1</span> <span style="border: 1px solid black;">2</span> ...
<b>Elementos não-controladores</b>										
Carga genérica										
...	-2	-2	-2	20	0	0	0	0	...	

Fonte: autoria própria.

### 3.3.4.1 MRPs para cargas passivas

Para definir a MRP de uma carga é necessário definir o seu preço máximo de compra ( $P_{\$-max}$ ). De acordo com conceitos simples de compra e venda é possível definir prioridade para cargas, simplesmente escolhendo de forma adequada o preço máximo de compra. Por exemplo, a energia é mais valorizada por cargas de maior prioridade, portanto, podem se manter ligadas com preços mais altos. Ao mesmo tempo, cargas de menor prioridade, devem ser desligadas caso o preço sinalizado aumente. Em (3.9) é apresentado um exemplo de três MRPs para cargas com diferentes níveis de prioridade: alta prioridade ( $MRP_{AP}$ ), média ( $MRP_{MP}$ ) e baixa prioridade ( $MRP_{BP}$ ).

$$\begin{aligned}
 \mathbf{pvec}_n &= [ \$-1 \quad \$0 \quad \$1 \quad \$2 \quad \$3 \quad \$4 \quad \$5 \quad \$6 \quad \$7 \quad \$8 ] \\
 MRP_{AP} &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad 20 \quad 0 \quad 0 \quad 0 ] \\
 MRP_{MP} &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad 20 \quad 0 \quad 0 ] \\
 MRP_{BP} &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad 20 \quad 0 ]
 \end{aligned} \tag{3.9}$$



De maneira general, o cálculo das MRPs para uma fonte unidirecional qualquer é sintetizado pelo Algoritmo 3.

---

**Algoritmo 3:** Cálculo de MRPs para fontes unidirecionais

---

1.  $i =$  comprimento (**pvec**);
  2. MRP = zeros ( $1 \times i$ );
  3. **DE**  $n = -1$ :  $i-1$ , **faça**
  4.     **SE**  $n < P_{\$-min}$ , **então**
  5.         |     MRP[ $1 \times n+1$ ] = 0;
  6.     **Fim**
  7.     **SE**  $n == P_{\$-min}$ , **então**
  8.         |     MRP[ $1 \times n+1$ ] = 1;
  9.     **Fim**
  10.    **SE**  $n > P_{\$-min}$ , **então**
  11.         |     MRP[ $1 \times n+1$ ] = 2;
  12.     **Fim**
  13.      $n = n + 1$ ;
  14. **Fim**
- 

### 3.3.4.3 MRPs para elementos bidirecionais

Um elemento bidirecional pode operar como fonte ou carga. Um conversor de tensão c.c.-c.a. conectado à rede, por exemplo, pode atuar como inversor  $(-2, -1, 0)$  ou como retificador  $(0, 1, 2)$ . Dois preços devem ser parametrizados para este caso, e os modos  $(-1)$  e  $(1)$  são atribuídos as colunas relacionadas aos limites de compra ( $P_{\$-max}$ ) e de venda ( $P_{\$-min}$ ), respectivamente. Além disso, as MRPs devem ser completados com os modos  $(-2, 0, 2)$ , em ordem crescente. Em (3.11), são apresentados dois exemplos de MRPs para elementos bidirecionais. Na  $MPR_{bid-1}$ , são considerados  $P_{\$-max} = \$1$  e  $P_{\$-min} = \$3$ , resultando nos modos  $(-1)$  e  $(1)$ , respectivamente. No segundo exemplo, é considerado  $P_{\$-max} = P_{\$-max}$  para a  $MPR_{bid-2}$ , portanto o número  $(11)$  é atribuído ao preço  $\$2$ , para sinalizar os modos de operação  $(-1/1)$ , que ocorrem ao mesmo tempo.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{pvec}_n &= [ \$-1 \quad \$0 \quad \$1 \quad \$2 \quad \$3 \quad \$4 \quad \$5 \quad \$6 \quad \$7 \quad \$8 ] \\
 MRP_{bid-1} &= [ -2 \quad -2 \quad -1 \quad 0 \quad 1 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 ] \quad (3.11) \\
 MRP_{bid-2} &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad 11 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 ]
 \end{aligned}$$

O método de cálculo das MRPs para um elemento qualquer é sintetizado no Algoritmo 4, incluindo diferentes condições de operação.



---

**Algoritmo 4:** Cálculo de MRPs para elementos bidirecionais
 

---

```

1.  $i = \text{comprimento}(\mathbf{pvec})$ ;
2.  $\text{MRP} = \text{zeros}(\text{OCs} \times i)$ ;
3. DE  $m = 1$ : OCs, faça
3.   DE  $n = -1$ :  $i-1$ , faça
4.     SE  $n < P_{\$-min.}$ , então
5.        $\text{MRP}[m \times n + 1] = -2$ ;
6.     Fim
7.     SE  $n == P_{\$-min.}$ , então
8.        $\text{MRP}[m \times n + 1] = -1$ ;
9.     Fim
10.    SE  $n > P_{\$-min.}$  E  $n < P_{\$-max.}$ , então
11.       $\text{MRP}[m \times n + 1] = 0$ ;
12.    Fim
13.    SE  $n == P_{\$-max.}$ , então
14.       $\text{MRP}[m \times n + 1] = 1$ ;
15.    Fim
16.    SE  $n > P_{\$-max.}$ , então
17.       $\text{MRP}[m \times n + 1] = 2$ ;
18.    Fim
22.     $n = n + 1$ ;
23.  Fim
24.  SE  $P_{\$-max.} == P_{\$-min.}$ , então
25.     $\text{MRP}[m \times P_{\$-max} + 1] = 11$ ;
26.  Fim
27.   $m = m + 1$ ;
28. Fim

```

---

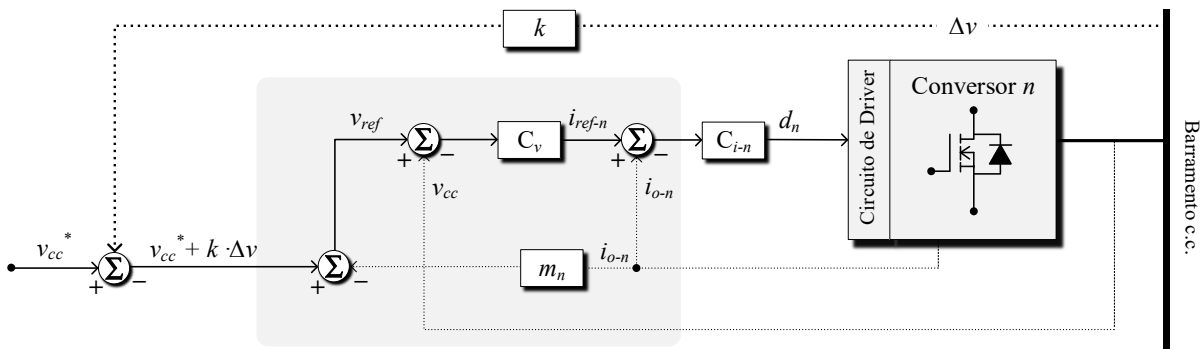
Aqui encontra-se uma motivação para a adoção de valores inteiros para o preço interno: de acordo com os Algoritmos 2, 3 e 4, o índice de colunas das MRPs, é igual ao preço, somado uma unidade, devido a adição do valor  $\$-1$ . Isso simplifica de maneira significativa os algoritmos de cálculo das MRPs. No Algoritmo 4, por exemplo, após o preenchimento da MRP de  $[n = -1 : i-1]$ , o número (11) é atribuído a condição  $[P_{\$-min} = P_{\$-max}]$  através de uma verificação simples.

### 3.4 ESCOLHA DAS MALHAS DE REGULAÇÃO DE TENSÃO

Como contribuição desta seção ao trabalho, é proposto que uma malha externa de controle, baseada em *droop*, seja adicionada aos controladores primários. Isso permite que os conversores atuem em modo de compartilhamento de potência (*droop*) nos modos (-1) e (1). Considerando MRPs à nível de gerenciamento de potência, é possível garantir quando um conversor de potência atua em modo *droop*, em potência nominal ou mesmo desligado. Portanto, esta não é uma simples estratégia de compartilhamento de potência, como controladores *droop* convencionais. Isso contribui para a eficiência do gerenciamento de potência no contexto de nanorredes e edifícios autossuficientes em energia.

Em Bellinaso (2017), nenhuma estratégia de compartilhamento de potência é prevista. Além disso os desvios de tensão inerentes aos controladores *droop*, não permitem calcular o preço de maneira correta. O resultado é que, considerando a restrição do controle de tensão, não há um método direto para adicionar novos elementos à nanorrede (CARVALHO *et al.*, 2021a). Para superar esta limitação, o controle *droop* hierárquico é implementado para os modos (-1) e (1). A malha de controle interna ( $C_v$ ) é responsável pelo compartilhamento de potência; enquanto a malha de controle externa ( $k \cdot \Delta v$ ) é necessária para reduzir desvios de tensão do controle *droop* convencional. Esta estratégia de controle é apresentada na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Malhas de regulação de tensão para implementação dos modos -1 e 1.



Fonte: autoria própria.

#### 3.4.1 Avaliação dos controladores *droop* para conversores em paralelo

Para a avaliação dos controladores *droop*, hierárquico e convencional, ambas as estratégias de controle foram simuladas na plataforma Typhoon-HIL 602+. Neste ensaio é

considerado o compartilhamento de potência entre o carregador de baterias (192 V / 5,2 A) e conversor de tensão c.c.-c.a. ( $127 V_{rms} / 7,87 A_{rms}$ ). Em relação aos parâmetros dos conversores, as especificações do sistema real foram incluídas na simulação, de acordo com o projeto detalhado no Capítulo 4 e parâmetros apresentados no Apêndice A. Para implementação do sistema de controle foi utilizado o processador digital de sinais TMSF28379D, do fabricante *Texas Instruments*.

Na Tabela 3.2 são apresentados os principais parâmetros pra implementação dos controladores. Adicionalmente, é necessário definir um critério de projeto para o desvio de tensão no barramento c.c. em LVDC. Considerando o desvio de tensão como 5% (19 V), os coeficientes de decaimento devem ser iguais a 7,21, porque ambos os conversores entregam a mesma corrente nominal de 2,63 A (1 kW) ao barramento c.c.. Esse valor foi escolhido por estar de acordo com parâmetros comuns na literatura.

Tabela 3.2 – Principais parâmetros de implementação dos controladores *droop*.

Parâmetro	Descrição	Valor
$f_{sv}$	Frequência de amostragem de tensão	2,4 kHz
$f_{si}$	Frequência de amostragem das correntes	24 kHz
$f_{spmp}$	Frequência de atualização do algoritmo de SPMP	2,4 Hz
$f_{cv}$	Frequência de corte dos controladores de tensão	24 Hz
$f_{ci}$	Frequência de corte dos controladores de corrente	240 Hz
$f_{\Delta v}$	Frequência de atualização do desvio de tensão	240 Hz
$m_{ca}$	Coefficiente de decaimento do conversor c.c.-c.a.	7,21
$m_{bat}$	Coefficiente de decaimento do carregador de baterias	7,21
$k$	Ganho do controlador hierárquico	10
MF	Margem de fase mínima dos controladores	80°

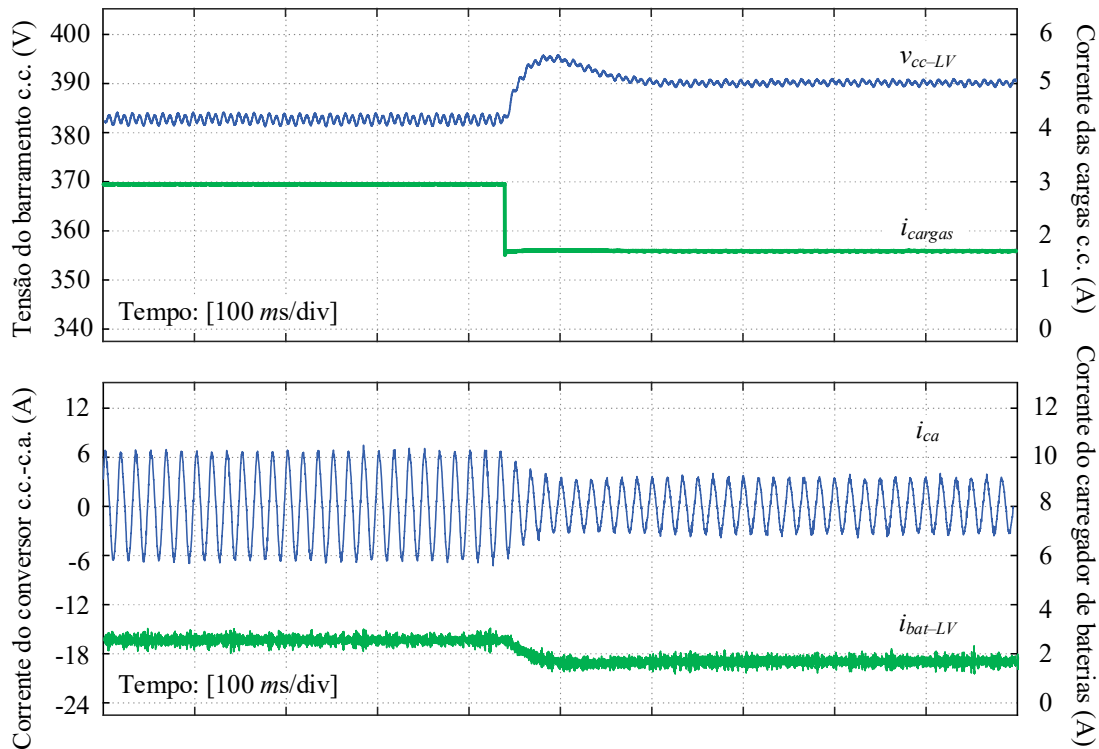
Nos ensaios seguintes, são consideradas apenas as malhas de controle a nível primário, porque o objetivo é avaliar a resposta dos controladores *droop*. Como não há diferenças de potência nominal, para ambos os conversores é considerado o mesmo ganho de decaimento.

#### 3.4.1.1 Resultados de simulação com controle *droop*

No primeiro ensaio, o compartilhamento de potência com controladores *droop* convencionais é avaliado. Nesta simulação, ambos os conversores podem operar em condições

nominais e distúrbios de potência são aplicados no barramento em LVDC (380 V). Na Figura 3.10 são apresentados os resultados de simulação.

Figura 3.10 – Resultado de simulação para os controladores *droop* convencionais, considerando o ensaio de variação de cargas.



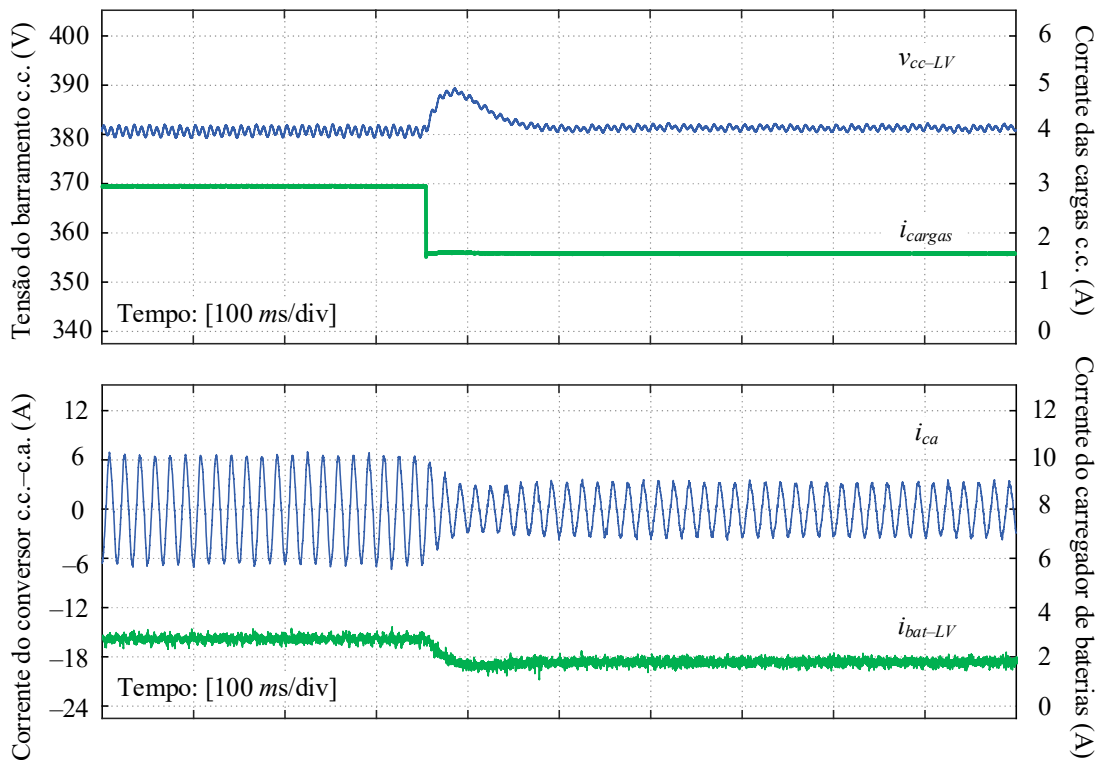
Fonte: autoria própria.

Inicialmente, duas cargas de 500 W e 600 W são conectadas ao barramento c.c. e um desvio de tensão de 2,5 V é verificado na tensão  $v_{cc-LV}$ . Nesta situação, o conversor c.c.-c.a. processa aproximadamente 540 W (4,25  $A_{rms}$ ), enquanto o carregador de baterias bidirecional processa 560 W (2,91 A). Após um intervalo de aproximadamente 400 ms, a carga de 500 W é desconectada do barramento. O resultado é uma variação positiva de tensão, devido ao distúrbio de potência. Em regime permanente, os controladores *droop* regulam a tensão do barramento c.c., permitindo o compartilhamento de potência proporcional a cada conversor, sendo 280 W para o conversor c.c.-c.a. e 320 W para o carregador de baterias. Sem o controle do desvio de tensão, é verificado no barramento c.c. um erro de tensão de 10 V em regime permanente.

No segundo ensaio, o controle hierárquico é considerado. O resultado é apresentado na Figura 3.11, onde as mesmas variações de potência são avaliadas. Devido a malha externa de controle, a ação  $[k\Delta v]$  é enviada para cada conversor com o objetivo de reduzir o erro de tensão.

Em regime permanente, após o degrau de carga, o barramento c.c. continua regulado em aproximadamente 380 V. Em relação ao compartilhamento de potência, resultados semelhantes são verificados para ambas as situações, controle *droop* convencional e hierárquico. Entretanto, com a aplicação da malha externa de controle, é possível verificar uma redução significativa do erro de tensão.

Figura 3.11 – Resultado de simulação para o controle *droop* hierárquico, considerando para reduzir os desvios de tensão no barramento c.c..



Fonte: autoria própria.

Esta é a motivação para a escolha pelos controladores *droop* hierárquicos: considerando a estratégia de cálculo de preços, sintetizada no Algoritmo 1, é notável que quanto maiores os desvios de tensão, maiores serão os erros de cálculo de preço. Isso ocorre porque os desvios de tensão ( $\Delta v$ ) podem ser maiores do que as próprias tensões de comparação. Para as tensões de comparação do barramento c.c. em LVDC foi escolhido um passo de variação de 8 V de acordo com a metodologia apresentada na subseção 3.1.1. Por outro lado, de acordo com os resultados do controle *droop* convencional, 10 V foram verificados após o degrau de carga. Isso justifica a escolha pela estrutura de controle apresentada na Figura 3.9.

Na subseção seguinte, será apresentada as considerações para aplicação da estratégia de controle à sistemas com barramentos c.c. interconectados e conversores *interlink*.

### 3.5 ESTRUTURA DO GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA PARA BARRAMENTOS INTERCONECTADOS

As malhas de controle propostas na seção 3.3 permitem superar uma restrição importante do método de gerenciamento de potência baseado em MRPs. Por outro lado, a proposta de Bellinaso (2017) considera que todos os elementos de potência são gerenciados de forma centralizada e um único barramento c.c. é analisado. Para sistemas com diferentes barramentos interconectados, esta proposta deve incluir uma estrutura de comunicação, o que torna complexo a adição de novos barramentos auxiliares à nanorrede em extra-baixa tensão.

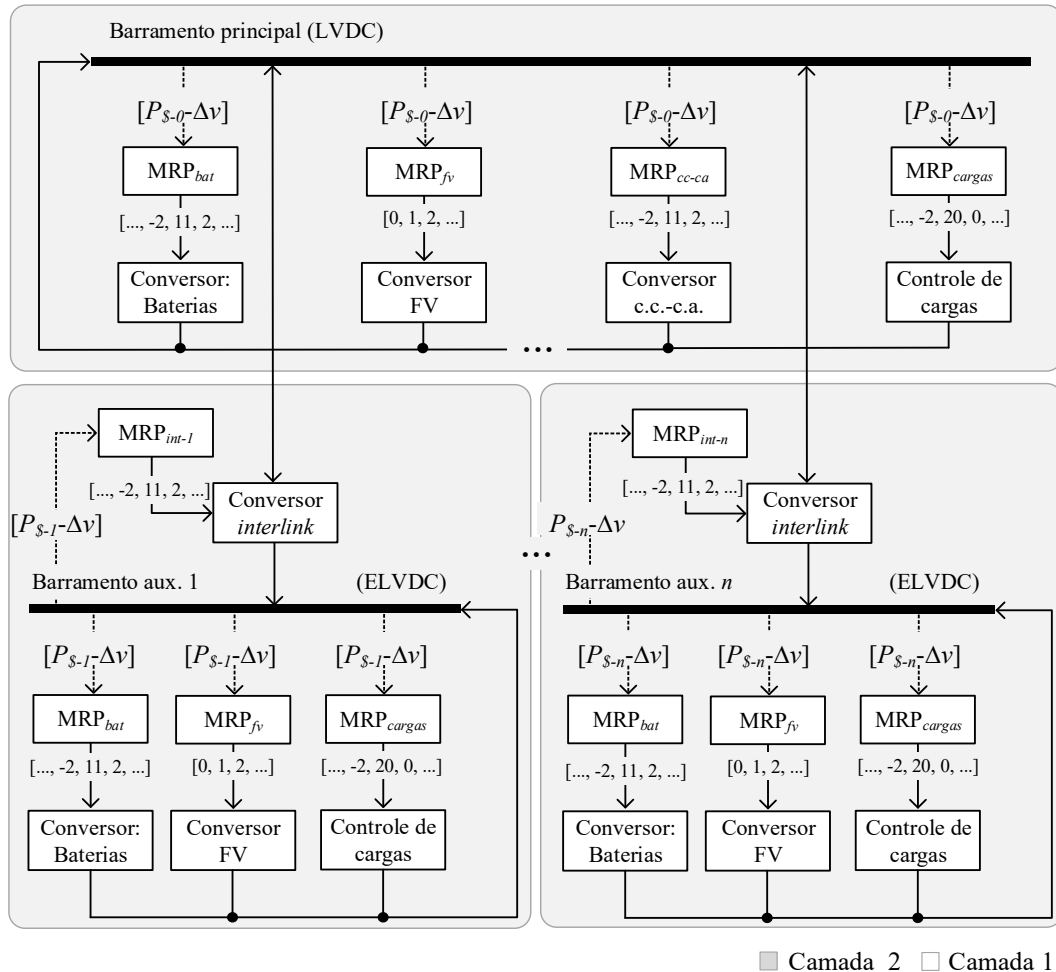
Para que novos barramentos sejam adicionados à nanorrede é proposto que o gerenciamento de potência seja implementado de forma distribuída. Para estender o gerenciamento de potência para sistemas interconectados, diferentes preços são utilizados e cada subsistema é gerenciado de forma independente. Nesta tese, cada barramento c.c. deve ser sinalizado e um preço interno é calculado para cada subsistema. Isso resulta em diferentes níveis de descentralização:

- i.* Na Camada 2, cada subsistema de barramento c.c. interconectado é gerenciado de maneira individual, dado um conjunto de MRPs.
- ii.* Na Camada 1, cada conversor de potência define seu próprio modo de operação, em resposta ao preço interno sinalizado pelo barramento c.c. local. É necessário observar que após dimensionadas, as MRPs podem ser implementadas diretamente em um controlador digital de sinais, porque apenas o preço e o desvio de tensão devem ser informados às malhas inferiores de controle.

Na Figura 3.12 é apresentada a estrutura de controle para o gerenciamento de potência de sistemas com múltiplos barramentos. A principal vantagem desta proposta é que nenhum *link* de comunicação é necessário entre os barramentos interconectados. Isso ocorre porque cada preço é calculado localmente, e quando um novo barramento c.c. é inicializado, um distúrbio de potência ocorre no barramento principal. Devido ao método de resposta ao preço, a nanorrede é automaticamente gerenciada porque apenas o preço do barramento principal é

recalculado. Por outro lado, uma desvantagem é que um gerenciamento centralizado ainda é necessário para cada subsistema interconectado.

Figura 3.12 – Estrutura de gerenciamento de potência distribuído, para sistemas interconectados.



Fonte: autoria própria.

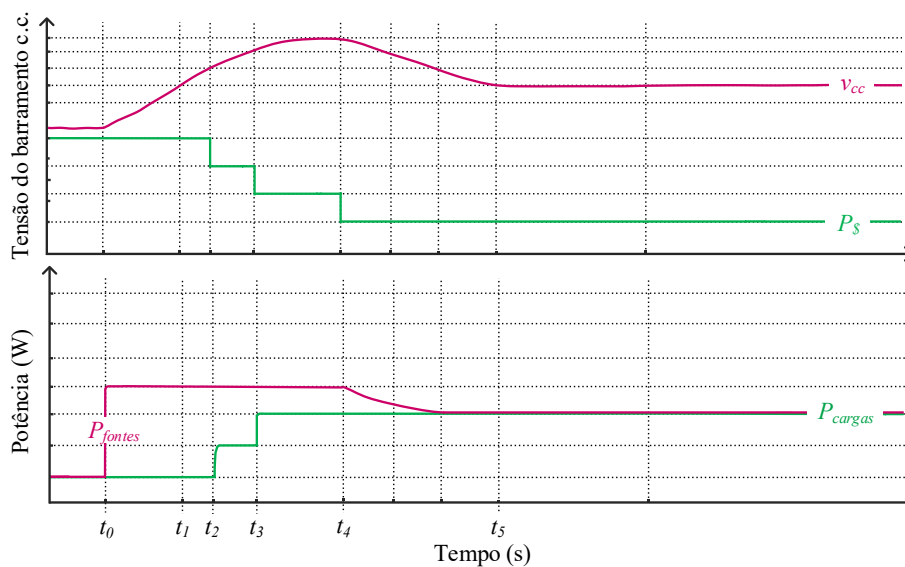
Na sequência do trabalho serão apresentadas as curvas teóricas relacionadas a resposta transitória do gerenciamento de potência e tensão do barramento c.c., quando considera a aplicação de matrizes de resposta ao preço.

### 3.5.1 Gerenciamento baseado em resposta ao preço

De acordo com a ideia de preços e MRPs, a inicialização do sistema tem um padrão conhecido e bem definido. Primeiramente, todas as fontes e elementos bidirecionais estão

desligados, portanto, o preço é tão grande quanto possível, porque neste momento não há energia disponível à nanorede. Isso motiva que todas as fontes iniciem em potência nominal, devido ao alto preço (BELLINASSO, 2017). Quando as fontes são ligadas ( $t_0$ ), a tensão do barramento c.c. aumenta e o preço interno reduz gradualmente (em  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  e  $t_4$ ): o resultado é ilustrado na Figura 3.13. Isso permite que as cargas sejam ligadas (em  $t_2$  e  $t_3$ ), devido à redução de preços.

Figura 3.13 – Curvas teóricas de inicialização da nanorede, considerando o método de gerenciamento de potência com MRPs.



Fonte: autoria própria.

Também é necessário observar que, após a estabilização do preço ( $t_4-t_5$ ), o gerenciador define os controladores de tensão para o barramento c.c., de acordo com método das MRPs. Isso garante o balanceamento de potência em regime permanente porque a potência total do sistema é ajustada em função do controle de tensão. Adicionalmente, apenas os elementos que atuam com controle de tensão (modo *droop*) operam com potência limitada. Portanto, não é necessário que todos os conversores atuem em modo de compartilhamento de potência, como ocorre com controladores *droop* convencionais ou *droop* adaptativos sem *links* de comunicação.

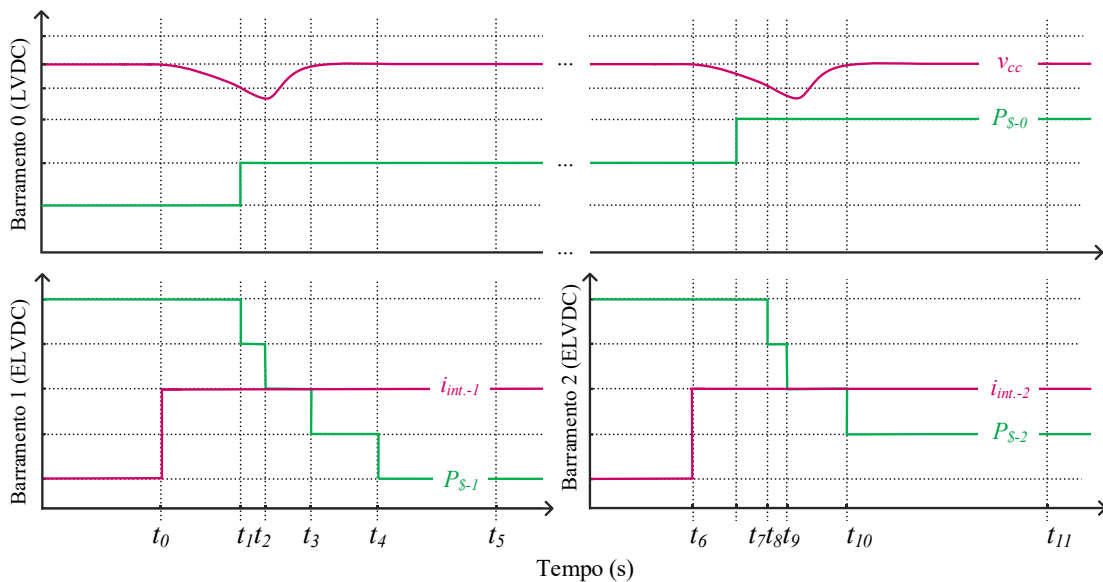
Em regime permanente o preço é estável de acordo com a energia disponível na nanorede e demanda de cargas. É necessário observar que cada subsistema pode ser inicializado de forma independente. Por exemplo, o barramento em LVDC pode ser inicializado sem conexão com a rede elétrica c.a.. Da mesma forma, um barramento em ELVDC também



pode ser inicializado sem que o conversor *interlink* esteja conectado ao barramento principal. Isso é possível porque cada elemento responde ao preço de forma autônoma.

Em relação a inicialização de sistemas interconectados, cada conversor *interlink* opera como um distúrbio de potência para o barramento principal (em LVDC). Isso é coerente com a arquitetura da nanorrede, porque uma vez que os barramentos auxiliares em extra-baixa tensão (ELVDC) são limitados em potência, é natural que o barramento principal em baixa tensão (LVDC) atue para fornecer suporte de potência aos barramentos adicionais (KUMAR *et al.*, 2017), (LIU *et al.*, 2019), (CARVALHO *et al.*, 2021a), (ASKARIAN, PAHLEVANI, KNIGHT, 2021). Quando um barramento auxiliar em extra-baixa tensão é inicializado, o conversor *interlink* atua com potência nominal em modo (2), ou seja, com fluxo de potência positivo para o barramento em ELVDC. Conseqüentemente, um distúrbio de potência negativo é resultante em LVDC, e o preço do barramento principal deve ser recalculado. Na Figura 3.14, é apresentado um exemplo em que dois barramentos auxiliares são adicionados à nanorrede, em  $t_0$  e  $t_6$ .

Figura 3.14 – Curvas teóricas de inicialização da nanorrede considerando barramentos interconectados.



Fonte: autoria própria.

De acordo com o resultado da Figura 3.14, considerando o gerenciamento baseado em preços é possível garantir o balanceamento de potência sem *links* de comunicação complexos, porque apenas o preço do barramento principal em LVDC deve ser recalculado. Isso mostra que o sistema é naturalmente robusto a elementos não modelados. Portanto, novos barramentos

podem ser adicionados a nanorrede sem que todo o gerenciamento de potência seja redimensionado, como ocorreria em máquinas de estados convencionais e outras abordagens de controle centralizadas. Além disso, é necessário observar que em caso de um dos barramentos colapsar, é garantida a operação segura de outros, devido ao gerenciamento distribuído e individual para cada subsistema.

### **3.5.2 Considerações em relação a teoria de preços e projeto das MRPs para os conversores *interlink***

Como pressuposto na seção (3.4.1) a operação do conversor *interlink* está relacionada ao gerenciamento de potência do subsistema em extra-baixa tensão. Naturalmente esta escolha se deve a hipótese de que cada subsistema interconectado é gerenciado de maneira individual. Além disso, devido a arquitetura da nanorrede que inclui barramentos em extra-baixa tensão, os seguintes critérios de projeto devem ser adotados:

- i.* As cargas em extra-baixa tensão apresentam maior prioridade devido à natureza crítica de suas aplicações;
- ii.* Para aumentar a confiabilidade da nanorrede, é necessário que as fontes de *back-up* em extra-baixa tensão tenham a alta disponibilidade de energia, permitindo alimentar as cargas pelo maior tempo possível. Isso significa que preferencialmente a energia de baterias ou de fontes não-renováveis não deve ser transferida para o barramento principal;
- iii.* Cada conversor *interlink* opera como um distúrbio de potência para o barramento principal. Isso é devido a capacidade limitada de potência do barramento de extra-baixa tensão, o que não permite que o conversor *interlink* forneça qualquer suporte de potência para o barramento em LVDC.

O resultado dos critérios (*i*), (*ii*), e (*iii*) é que a energia em extra-baixa (ELVDC) tensão deve ser mais valorizada que a energia em baixa tensão (LVDC). A consequência é que o preço em extra-baixa tensão pode representar um conjunto maior de preços do barramento principal. Essa ideia é semelhante ao conceito de câmbio entre diferentes moedas. Além disso, deve-se considerar que:

$\$-1$ : O preço  $\$-1$  é adicionado ao gerenciamento de potência como um fator de segurança. Isso permite desligar todas as fontes quando necessário limitar sobretensões indevidas em um barramento c.c.. Portanto,  $\$-1$  é equivalente para todos os barramentos.

\$ 0: O preço \$0 é equivalente ao preço \$0 real. Isso significa que \$0 em um preço interno qualquer será equivalente para o \$0 de todos os barramentos da nanorrede.

\$ 1: Para garantir a prioridade das cargas em extra-baixa tensão, o preço \$1 deve representar todo o conjunto de preços necessário à baixa tensão. Isso significa que a carga de maior prioridade em baixa tensão, mesmo que parametrizada com o maior limite de venda possível ( $P_{\$-LV-max}$ ), ainda terá menor prioridade que qualquer carga em extra-baixa tensão.

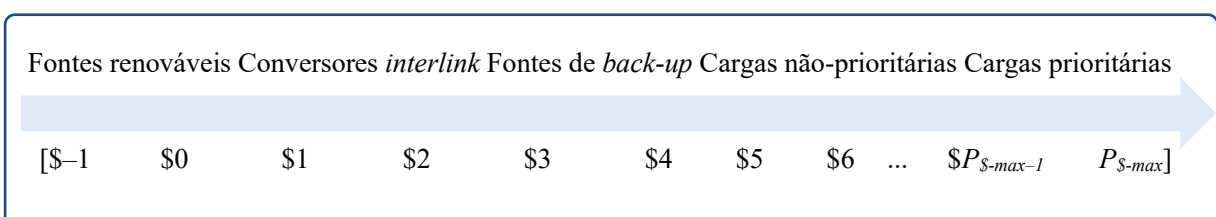
A equivalência de preços entre barramentos é apresentada na Tabela 3.3. É necessário observar que o câmbio de preços é coerente com a teoria econômica: uma vez que o barramento de maior tensão concentra os maiores níveis de potência, é natural que se tenha uma valorização diferente da energia neste subsistema, porque este bem de consumo é abundante em baixa tensão. Ou seja, é uma consequência da teoria de preços que os barramentos e subsistemas em extra-baixa tensão deem maior valor a energia, devido sua a capacidade limitada de potência.

Tabela 3.3 – Equivalência de preços entre diferentes barramentos interconectados.

Conjunto de preços internos (\$)						
Extra-baixa tensão ( $P_{\$-1}$ )	\$-1	\$0	\$1	\$2	...	$P_{\$-ELV-max}$
Baixa tensão ( $P_{\$-0}$ )	\$-1	\$0	[\$1, \$2, ..., $P_{\$-LV-max}$ ]		...	

Em relação a teoria de preços, como previamente discutido, cargas de maior prioridade devem apresentar maiores limites de compra, da mesma forma que geradores com menor custo de produção pode ser parametrizados com os menores limites de venda. Para os geradores renováveis, a escolha do valor \$0 como limite de compra é natural porque seu custo marginal de produção é nulo. Por outro lado, geradores não-renováveis e armazenadores de energia, devem apresentar preços intermediários entre as fontes de menor custo e as cargas de maior prioridade (BELLINASSO, 2017). Isso é ilustrado na Figura 3.15, que apresenta a lógica de parametrização de preços para os diferentes elementos da nanorrede.

Figura 3.15 – Lógica de parametrização dos diferentes elementos de potência da nanorrede.



Fonte: autoria própria.

Considerando a teoria de preços, e as critérios (i), (ii) e (iii), é possível concluir que a MRP para um conversor *interlink* deve ser parametrizada com valores entre \$0 e os limites de venda das fontes de *back-up*. Isso garante que a energia das fontes de maior custo, não seja integrada para o barramento principal. Desta forma, é natural que a escolha dos limites de compra/venda do conversor *interlink* seja o valor mais próximo de \$0 possível.

### 3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi apresentada a fundamentação teórica relacionada a proposta de gerenciamento de potência para nanorredes com barramentos interconectados. Como principal resultado, o método de gerenciamento de potência baseado em preços foi sintetizado em um algoritmo de cálculo proposto para a implementação do sistema em um controlador digital de sinais ou microprocessador. Adicionalmente, como método de organização do sistema de controle, são propostas matrizes de resposta ao preço. Novamente, o método é sintetizado em algoritmos de cálculo para MRPs, considerando a aplicação em cargas, fontes e elementos bidirecionais.

Para evitar restrições de controle em relação a regulação de tensão do barramento c.c., controladores *droop* e *droop* hierárquico foram avaliados através de simulações em tempo real. Devido ao menor desvio de tensão, para o compartilhamento de potência são utilizadas duas malhas de controle. A primeira relacionada aos controladores *droop* e a segunda para redução dos desvios de tensão. Nesta estratégia, os controladores *droop* são utilizados apenas à nível primário. Portanto, a efetividade do gerenciamento de potência é mantida, porque os modos compartilhamento de potência não são necessários durante toda a operação da nanorrede.

No último momento, foi apresentada a estrutura do gerenciamento de potência e as curvas teóricas resultantes da estratégia de resposta ao preço. Para o controle de nanorredes com múltiplos barramentos, diferentes preços são calculados para cada sistema interconectado. O resultado é que o gerenciamento de potência pode ser implementado de maneira distribuída, simplificando a estrutura de comunicação, porque não é necessário trocas de informação entre barramentos. Para validar a proposta de gerenciamento, no Capítulo 4, é apresentado o desenvolvimento da nanorrede e os resultados do gerenciamento de potência.



## 4 ANÁLISE E ENSAIOS EXPERIMENTAIS DA ESTRATÉGIA PROPOSTA PARA NANORREDES COM MÚLTIPLOS BARRAMENTOS C.C.

Este capítulo apresenta as simulações e os resultados experimentais para a estratégia de gerenciamento de potência proposta para o controle de nanorredes com múltiplos barramentos e conversores *interlink*. Conforme descrito no Capítulo 3, as malhas de compartilhamento de potência (controladores *droop*) são utilizadas, apenas à nível primário. No nível secundário, vetores de preços e MRPs são utilizadas para garantir a efetividade do gerenciamento de potência. O sistema proposto inclui dois barramentos interconectados por um conversor *interlink*. O barramento principal em LVDC é dimensionado para uma tensão de 380 V, enquanto o barramento auxiliar em ELVDC é definido em 48 V. Estes valores foram escolhidos de acordo com as aplicações de interesse, que incluem cargas prioritárias em extra-baixa tensão. Adicionalmente, são inclusos no sistema geradores fotovoltaicos, bancos de baterias e cargas gerenciáveis distribuídas entre os barramentos.

### 4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROJETO

Para a implementação de uma nanorrede, diferentes abordagens são possíveis, incluindo um barramento c.c. centralizado, barramento c.a. e múltiplos barramentos. Em relação à arquitetura da rede, é fato que as redes c.a. têm sido dominante nos sistemas de distribuição devido a geração centralizada e transmissão predominantemente c.a.. Entretanto, o acoplamento de sistemas com barramento c.c. é interessante para as nanorredes porque torna fácil a integração com fontes distribuídas e sistemas de armazenamento de energia em escala de distribuição. Além disso, equipamentos eletrônicos baseados em baixa tensão e principalmente extra-baixa tensão c.c. têm apresentando aumento significativo em diferentes segmentos, incluindo cargas críticas como computadores, iluminação de segurança e equipamentos eletrônicos de uso geral. Neste tipo de aplicação, vários estágios de processamento de potência podem reduzidos com redes c.c. e com barramentos interconectados. Por outro lado, uma interface com a rede pública de distribuição (c.a.) ainda é necessária porque permite à nanorrede obter suporte de potência em casos críticos de geração ou alta demanda de cargas.

De maneira semelhante, na concepção de nanorredes com múltiplos barramentos e conversores *interlink*, é permitido a subsistemas em extra-baixa tensão obter suporte de potência do barramento principal em LVDC. No contexto de sistemas de potência em corrente

contínua, os padrões de tensão para transmissão são definidos em (IEC 61975, 2010), (IEEE 1709, 2010), (SIEMENS, 2011), (IEC, 2017):

- Alta tensão (HVDC): para transmissão com redes de 30 kV a 350 kV;
- Média tensão (MVDC): tensões inferiores a 30 kV e superiores a 1.5 kV;
- Baixa tensão (LVDC): transmissão com tensões inferiores a 1.5 kV.

Para nanorredes c.c., níveis de baixa tensão e extra-baixa tensão são utilizados de acordo com as aplicações. Por exemplo, para sistemas de telecomunicações, o uso de 380 V é comum para barramentos de baixa tensão, adicionando padrões de 12 V, 24 V, -48 V e 48 V para cargas críticas em extra-baixa tensão (KUMAR; ZARE; GHOSH, 2017).

Em um sistema com múltiplos barramentos, tensões elevadas são utilizadas para permitir a interface com a rede elétrica c.a.. Por outro lado, a escolha de um barramento auxiliar em extra-baixa tensão permite suprir cargas críticas de maneira direta, simplesmente adotando um valor de tensão comum as cargas (YUE *et al.*, 2018). O relatório técnico IEC (2017), indica padrões de 48 V para cargas inferiores a 1 kW e 350 V a 450 V para potências superiores.

Em relação aos níveis de tensão, são apresentadas em aplicações de baixa potência uma série de cargas c.c. que podem ser supridas em extra-baixa tensão. Para este caso, um padrão de 48 V pode ser adotado por ser um valor de tensão comum as cargas (KUMAR; ZARE; GHOSH, 2017). No Brasil, a ABNT NBR 5410 prevê padrões de segurança para tensões c.c. inferiores a 60 V para sistemas unipolares. Este é um indicativo conveniente para o desenvolvimento da nanorrede em 48 V, porque permite manutenções segura do lado de extra-baixa tensão porque não há riscos de choques elétricos. Neste contexto de aplicação, a definição de 380 V para o barramento em LVDC e 48 V para o barramento em ELVDC, apresenta uma série de características potenciais para o desenvolvimento do trabalho, incluindo:

- i.* adequação a níveis de SELV para o lado de extra-baixa tensão;
- ii.* fácil conexão com a rede elétrica c.a. e geração em LVDC;
- iii.* redundância de sistemas de armazenamento de energia, que podem ser distribuídos entre barramentos;
- iv.* adequação da nanorrede a aplicações já existentes.

## 4.2 DESCRIÇÃO DA NANORREDE ANALISADA

Considerando a contextualização apresentada no item (4.3), este trabalho analisa uma estrutura de nanorrede formada por cargas locais em extra-baixa tensão (ELVDC), arranjos

fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia, distribuídos entre barramentos interconectados. A partir do desenvolvimento do conversor *interlink* é realizada a conexão e o controle do fluxo de potência entre barramentos. O objetivo principal do conversor *interlink* é auxiliar na regulação de tensão do barramento auxiliar em extra-baixa tensão.

A conexão dos elementos à rede elétrica c.a. é realizada por meio de um conversor de tensão c.c.-c.a. de 1 kW ( $127 V_{rms} / 7,87 A_{rms}$ ), conectado ao barramento principal de baixa tensão (LVDC – 380 V). Ao barramento em LVDC também é adicionado um arranjo FV de 1,05 kWp e um banco de baterias de 192 V e 17 Ah. Para a conexão do banco de baterias ao barramento principal é utilizado um carregador de baterias bidirecional de 1 kW ( $192 V / 5,2 A$ ). O sistema de armazenamento em baixa tensão permite armazenar energia em casos de geração elevada e atuar como fonte secundária em casos de baixa geração ou alta demanda de cargas. Para o processamento de energia FV é utilizado um conversor de tensão c.c.-c.c. ( $114 V / 9,21 A$ ).

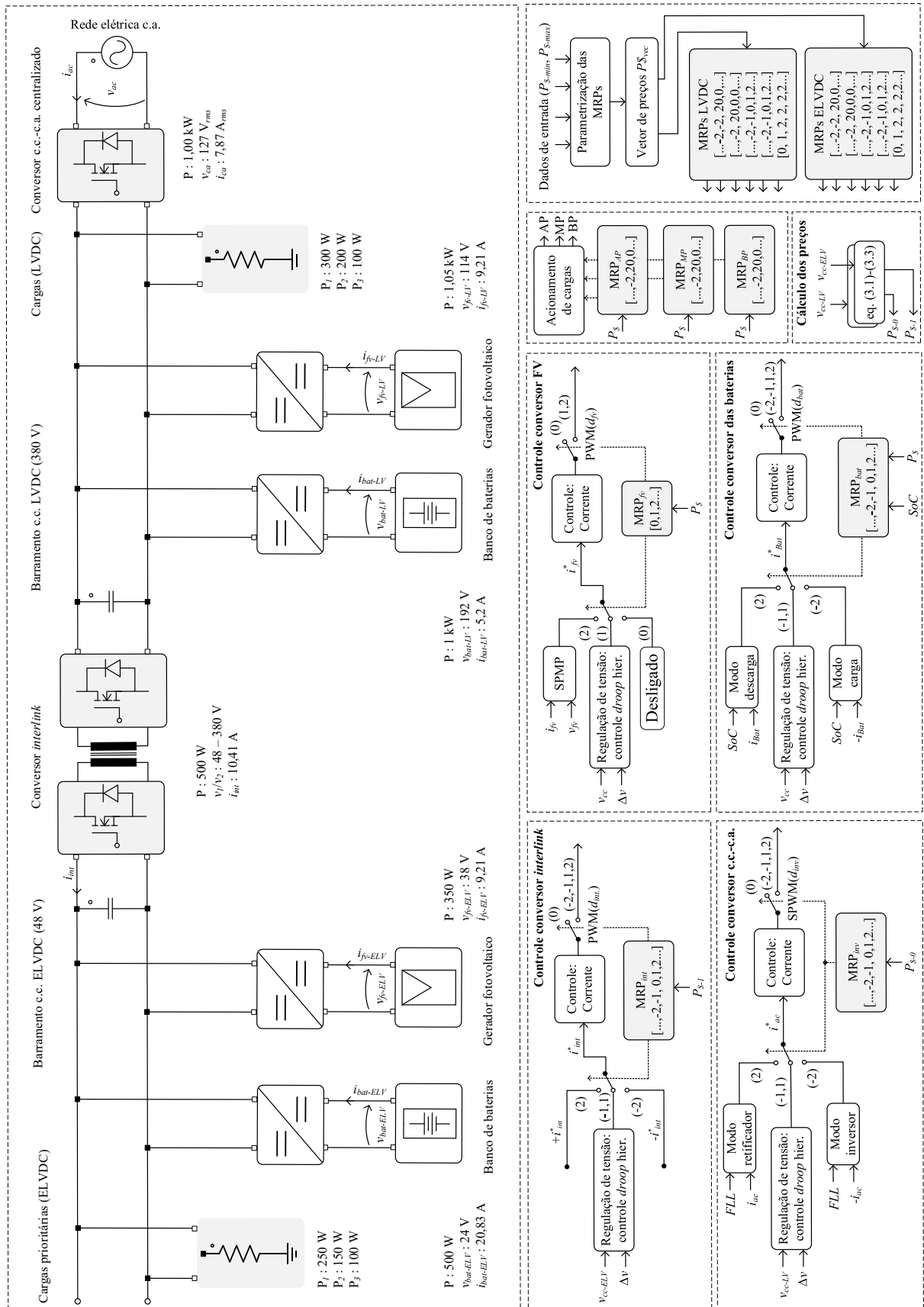
Em extra-baixa tensão, um banco de baterias de 24 V e 115 Ah (500 W) é adicionado ao barramento em ELVDC (48 V) através de um conversor c.c.-c.c. bidirecional de 24 V para 48 V ( $24 V / 20,83 A$ ). Isso permite obter redundância para o fornecimento de energia as cargas em extra-baixa tensão. Também é adicionado ao barramento auxiliar, um arranjo fotovoltaico de 350 Wp em extra-baixa tensão ( $38 V / 9,21 A$ ).

A Figura 4.1 apresenta o diagrama dos conversores que compõem a nanorrede, incluindo a geração FV, bancos de baterias, conversor *interlink* e inversor de tensão. Em relação as cargas, a cada barramento são conectadas três cargas genéricas divididas em níveis de prioridade: alta prioridade, média e baixa prioridade. Neste exemplo, a prioridade das cargas foi definida arbitrariamente. Entretanto, é necessário observar que a prioridade não está relacionada com o nível de potência, por exemplo, uma carga de menor potência pode ter maior prioridade de acordo com a exigência da sua aplicação.

Para organizar os resultados experimentais, cada subsistema será tratado de maneira individual, incluindo o projeto das matrizes de resposta ao preço, parâmetros de controle e principais parâmetros dos conversores de potência. O controle do sistema é implementado através de dois processadores digitais de sinais TMS320F28379D. Cada TMS320F28379 executa as leituras locais de tensão e corrente e realiza os cálculos necessários para os controladores primários e secundários de cada subsistema. Para o gerenciamento de potência, as matrizes de resposta ao preço definem os modos de operação dos conversores, de acordo com a sinalização do barramento c.c. e cálculo de preços. Portanto, não é necessária qualquer estrutura de comunicação entre os processadores.



Figura 4.1 – Diagrama de potência da nanorrede c.c. e gerenciamento de potência.

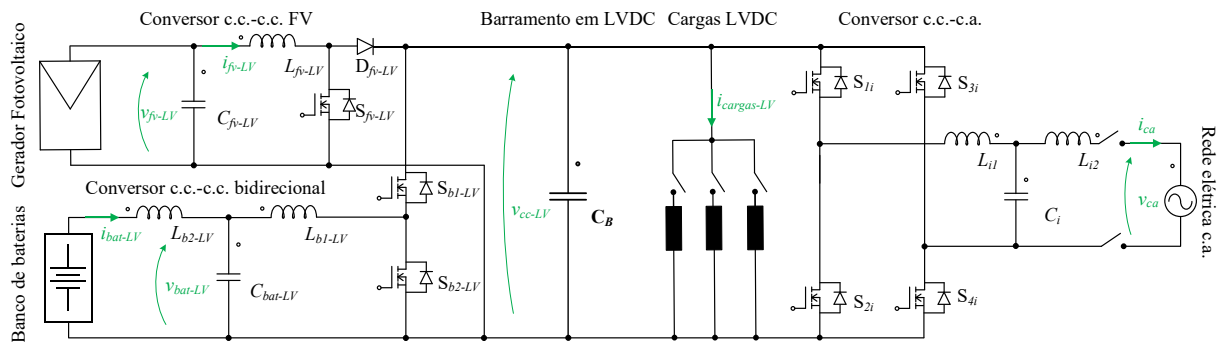


Fonte: autoria própria.

### 4.3 GERENCIAMENTO DO SISTEMA EM LVDC

Nesta seção, será abordado o gerenciamento de potência do barramento principal em LVDC. A nanorrede em LVDC é composta por um gerador fotovoltaico (1 kWp), um banco de baterias (1 kW) e cargas. As cargas são classificadas em: baixa prioridade para a carga de 100 W, média prioridade de 200 W e alta prioridade com 300 W. A nanorrede também é conectada ao sistema público de distribuição por um inversor de tensão (c.c.-c.a.) de 1 kW. O subsistema em LVDC é ilustrado na Figura 4.2. Os principais parâmetros utilizados para a implementação dos conversores são apresentados no Apêndice A.

Figura 4.2 – Diagrama dos conversores de potência da nanorrede c.c. em LVDC e variáveis medidas.



Fonte: autoria própria.

Inicialmente, o vetor de preços deve ser definido para o dimensionamento das MRPs, conforme os algoritmos apresentados no Capítulo 3. Para isso, os valores limites de compra e venda devem ser parametrizados pelo usuário do gerenciador de potência. Neste exemplo, o vetor (4.1) será considerado.

$$\mathbf{pvec}_{LV} = [ \$ -1 \ \$0 \ \$1 \ \$2 \ \$3 \ \$4 \ \$5 \ \$6 \ \$7 \ \$8 ] \quad (4.1)$$

Para a rede elétrica são considerados três condições de operação, divididas de acordo com o preço tarifário em: *i*) rede cara; *ii*) intermediária; e *iii*) barata. As condições de operação da rede estão relacionadas a possíveis variações de tarifa ao longo do dia, onde o consumidor/proprietário da nanorrede pode pagar uma tarifa maior ou menor de consumo, em função do horário e da demanda da rede.

Para o banco de baterias, as condições de operação devem estar relacionadas com o estado de carga, porque para baterias com baixo estado de carga, a energia deve apresentar

maior valor do que para uma bateria totalmente carregada. Neste exemplo, as condições de operação são divididas em: *i*) estado de carga alto (75–100%); *ii*) intermediário (50-75%); e *iii*) baixo estado de carga (0-50%).

Para o cálculo das MPRs, será considerada a parametrização apresentada na Tabela 4.1, que resume as condições de operação e preços limites de compra e compra e venda para cada elemento da nanorrede em LVDC. A atribuição dos números dentro de cada MRP é feita individualmente para cada elemento da nanorrede, de acordo com os algoritmos apresentados no Capítulo 3.

Tabela 4.1 – Parametrização dos preços limites máximos de compra e preços mínimos de venda para os elementos da nanorrede em LVDC.

Elemento	Condições de operação	Limite de compra ( $P_s$ )	Limite de venda ( $P_s$ )
1. Gerador Fotovoltaico	1 –	–	\$0
	1 Barata	\$1	\$1
2. Rede Elétrica	2 Intermediária	\$3	\$3
	3 Cara	\$5	\$5
3. Banco de Baterias	1 SoC (75–100%)	\$2	\$4
	2 SoC (50-75%)	\$4	\$6
	3 SoC (0-50%)	\$6	\$6
4. Carga de baixa prioridade	1 –	\$5	–
5. Carga de média prioridade	1 –	\$6	–
6. Carga de alta prioridade	1 –	\$7	–

A rede pública c.a. apresenta três condições de operação e, portanto, sua MRP tem três linhas. O modo 11 é atribuído aos preços \$1, \$3 e \$5 porque os limites de compra e venda coincidem. O restante da MRP é preenchido com os modos (–2) e (2), onde o conversor c.c.-c.a. opera como inversor e retificador, respectivamente. Para o gerador fotovoltaico o limite de venda é igual a \$0. Nesta coluna, é atribuído o modo de operação (1), permitindo que o conversor FV opere com potência limitada. O preço \$–1 é adicionado para garantir o desligamento do conversor (0) e o restante da MRP é preenchido com o modo (2), onde o conversor atua em SPMP.

As cargas consumidoras não atuam como elementos controladores porque são simplesmente ativadas com relés de acionamento. No preço limite de compra é atribuído o

modo (20), que representa o travamento do modo de operação. Para preços inferiores as cargas atuam em modo (-2), e para preços superiores são desligadas com a atribuição do modo (0).

$$\begin{aligned}
 \mathbf{pvec}_{LV} &= [ \$-1 \quad \$0 \quad \$1 \quad \$2 \quad \$3 \quad \$4 \quad \$5 \quad \$6 \quad \$7 \quad \$8 ] \\
 \text{Barata} &= [ -2 \quad -2 \quad \mathbf{11} \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 ] \\
 \text{MRP}_{rede-ca} \quad \text{Normal} &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad \mathbf{11} \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 ] \\
 \text{Cara} &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad \mathbf{11} \quad 2 \quad 2 \quad 2 ] \\
 \text{MRP}_{fv} &= [ 0 \quad \mathbf{1} \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 ] \\
 \text{MRP}_{carga-BP} &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad \mathbf{20} \quad 0 \quad 0 \quad 0 ] \quad (4.2) \\
 \text{MRP}_{carga-MP} &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad \mathbf{20} \quad 0 \quad 0 ] \\
 \text{MRP}_{carga-AP} &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad \mathbf{20} \quad 0 ] \\
 \text{SoC[alto]} &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad \mathbf{-1} \quad 0 \quad \mathbf{1} \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 ] \\
 \text{MRP}_{bat} \quad \text{SoC[interm.]} &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad \mathbf{-1} \quad 0 \quad \mathbf{1} \quad 2 \quad 2 ] \\
 \text{SoC. [baixo]} &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad \mathbf{11} \quad 2 \quad 2 ]
 \end{aligned}$$

Por último, o banco de baterias apresenta três condições de operação: *i*) os preços de \$2, e \$4 são definidos como limites de compra e venda para a bateria com alto estado de carga; *ii*) para o estado de carga intermediário são definidos como limites os preços \$4 e \$6; e *iii*) para baixo estado de carga os limites de compra e venda são definidos em \$6, onde o número (11) é atribuído para sinalizar a operação como (-1/1). De acordo com os Algoritmos 2, 3, e 4, o dimensionamento das MRPs é apresentado em (4.2) enquanto na Tabela 4.2 são mostradas as tensões de comparação. As tensões de comparação são definidas de acordo com a metodologia apresentada na subseção (3.2.1), que resultou num passo de variação de 8 V.

Tabela 4.2 – Tensões de comparação para o barramento principal em LVDC

Variações de tensão	Tensões de comparação								
Positiva (V)	388	396	404	412	420	428	436	444	452
Negativa (V)	372	364	356	348	340	332	324	316	308

Em relação ao sistema de controle, os parâmetros de projeto apresentados na Tabela 4.3 são considerados para a implementação dos controladores primários em DSP. Nesta estratégia de gerenciamento de potência, é considerado que as ações de controle funcionam em níveis independentes, ou seja, os níveis de controle superiores não interferem na estabilidade dos controladores inferiores.

Tabela 4.3 – Principais parâmetros de implementação dos controladores primários em LVDC.

Parâmetro	Descrição	Valor
$f_{sv}$	Frequência de amostragem de tensão	2,4 kHz
$f_{si}$	Frequência de amostragem das correntes	24 kHz
$f_{spmp}$	Frequência de atualização do algoritmo de SPMP	2,4 Hz
$f_{cv}$	Frequência de corte dos controladores de tensão	24 Hz
$f_{ci}$	Frequência de corte dos controladores de corrente	240 Hz
$f_{\Delta v}$	Frequência de atualização do desvio de tensão	240 Hz
$m_{fv}$	Coefficiente de decaimento do conversor FV	7,21
$m_{bat}$	Coefficiente de decaimento do carregador de baterias	7,21
$m_{ca}$	Coefficiente de decaimento do conversor c.c.-c.a.	7,21
MF	Margem de fase mínima dos controladores	80°

### 4.3.1 Resultados de simulação em tempo real para o sistema em LVDC

Inicialmente, para validar o conceito do gerenciamento de potência, simulações em tempo real foram realizadas através da plataforma Typhoon-HIL 602+. A opção por simulações em tempo real se deve a complexidade do sistema, quando considerada a adição de novos elementos à nanorede. Adicionalmente, a interface com o Typhoon-HIL permite implementar o gerenciamento de potência em um processador digital de sinais. As MRPs em (4.2) foram implementadas no DSP TMS320F28379, que é o mesmo utilizado na bancada experimental.

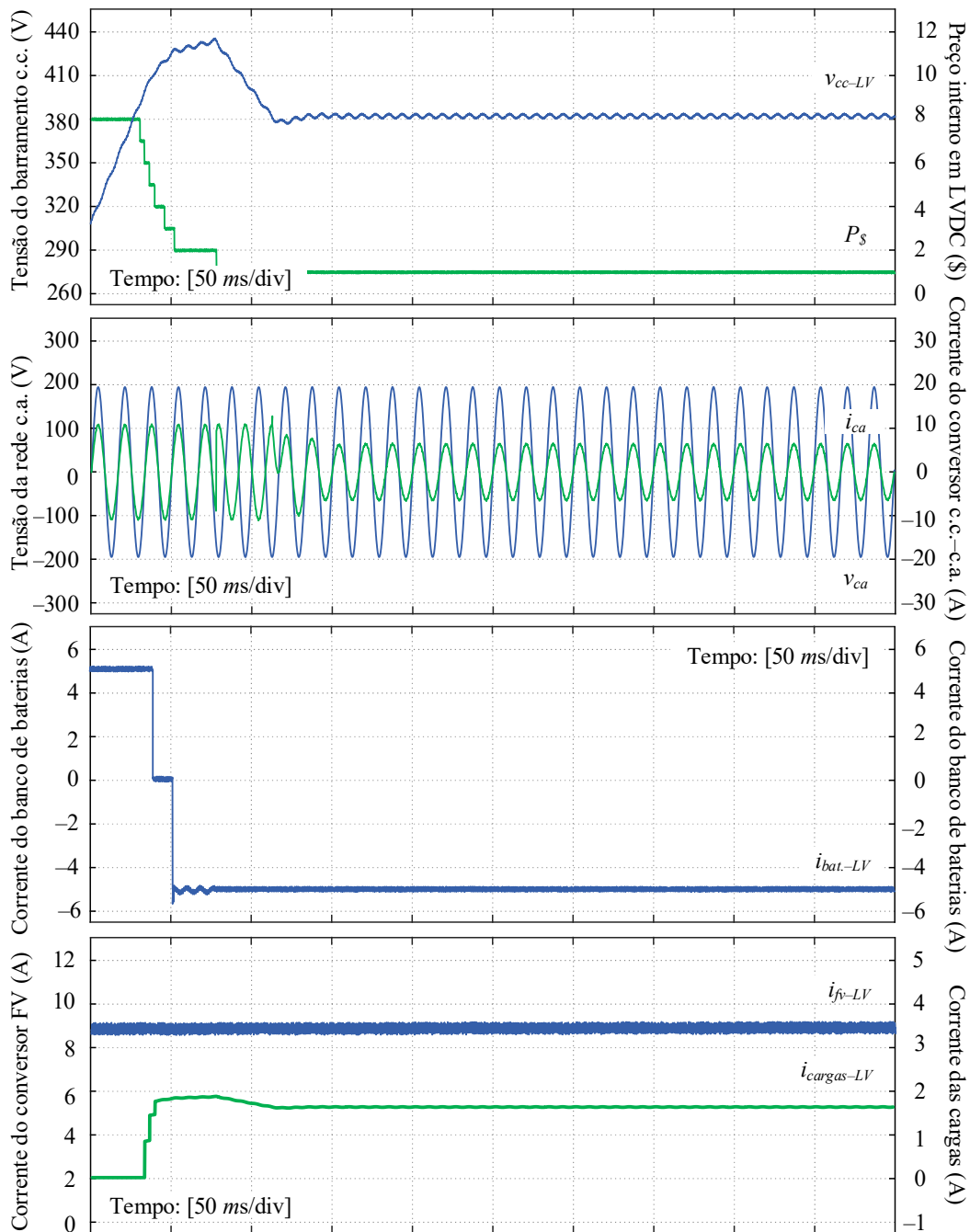
Para a validação da proposta de gerenciamento de potência, diferentes cenários foram analisados em simulação. Os principais cenários de testes consideram diferentes condições de operação da nanorede, incluindo adição de novas cargas e fontes ao sistema em LVDC. Estes testes foram escolhidos para validar as malhas de controle de nível inferior.

#### 4.3.1.1 Simulação 1: Inicialização do sistema

Inicialmente, para verificar a inicialização do sistema, é considerado o cenário em que as baterias estão com alto estado de carga e a rede elétrica e geração fotovoltaica estão disponíveis. A condição de operação da rede elétrica é definida como barata, portanto, a primeira linha da MRP<sub>rede-ca</sub> é utilizada. Quando o sistema está sendo inicializado, há baixa

disponibilidade de energia no barramento de baixa tensão. Conseqüentemente, o preço interno da energia deve ser o maior possível. Neste caso, de acordo com o vetor  $\mathbf{pvec}_{LV}$ , o sistema é inicializado com preço interno igual a \$8. O resultado é que o alto valor atribuído a energia mantém as cargas desligadas no início da inicialização do barramento de 380 V.

Figura 4.3 – Resultados de simulação para a inicialização do sistema: tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ); corrente do conversor c.c.-c.a. ( $i_{ca}$ ); tensão da rede c.a. ( $v_{ca}$ ); preço interno ( $P_s$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-LV}$ ); corrente das baterias ( $i_{bat-LV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-LV}$ ).



O preço igual a \$8 permite que todas as fontes sejam inicializadas com potência nominal. Portanto, os elementos a nanorrede fornecem a máxima energia disponível ao barramento c.c.. Esse resultado é apresentado na Figura 4.3. De acordo com as MRPs (4.2), com preço \$8, nenhuma das fontes está habilitada a controlar a tensão do barramento. Por esse motivo  $v_{cc-LV}$  é inicialmente elevada até ultrapassar o primeiro limite de comparação (388 V). Neste instante o preço é reduzido para \$7.

A MRP da carga de maior prioridade ( $MRP_{carga-AP}$ ) define o valor de (20) para o preço \$7. Isso representa o travamento do modo de operação, portanto, a carga permanece desligada até a tensão do barramento ultrapassar a segunda tensão de comparação, reduzindo o preço para \$6. Neste instante, é habilitando o modo (-2), permitindo que a carga seja ligada. Da mesma forma, a carga de média prioridade é ligada em \$5 e a carga de baixa prioridade em \$4, de acordo com a  $MRP_{carga-MP}$  e  $MRP_{carga-BP}$  respectivamente.

Com preço igual a \$4, o carregador de baterias assume o controle de tensão do barramento c.c. em modo (1). O resultado é que a corrente de descarga das baterias é zerada na tentativa de reduzir a tensão do barramento c.c.. Como ainda há energia excedente no barramento c.c., o preço é reduzido para \$3 e, posteriormente, para \$2. Em \$2, o carregador de baterias atua em modo (-1), ou seja, opera com em modo *droop*, limitando a potência processada para que seja possível controlar a tensão do barramento c.c. em 380 V.

Na última transição de modos de operação, no modo (-1), a corrente do banco de baterias satura em -5,2 A. Isso não permite controlar a tensão do barramento c.c., o que resulta em uma nova redução de preços. Em \$1, conversor c.c.-c.a. assume o controle de tensão em modo (11). Em regime permanente o preço é estável em \$1 e a tensão  $v_{cc-LV}$  controlada em torno de 380 V.

#### 4.3.1.2 Simulação 2: Adição de cargas à nanorrede

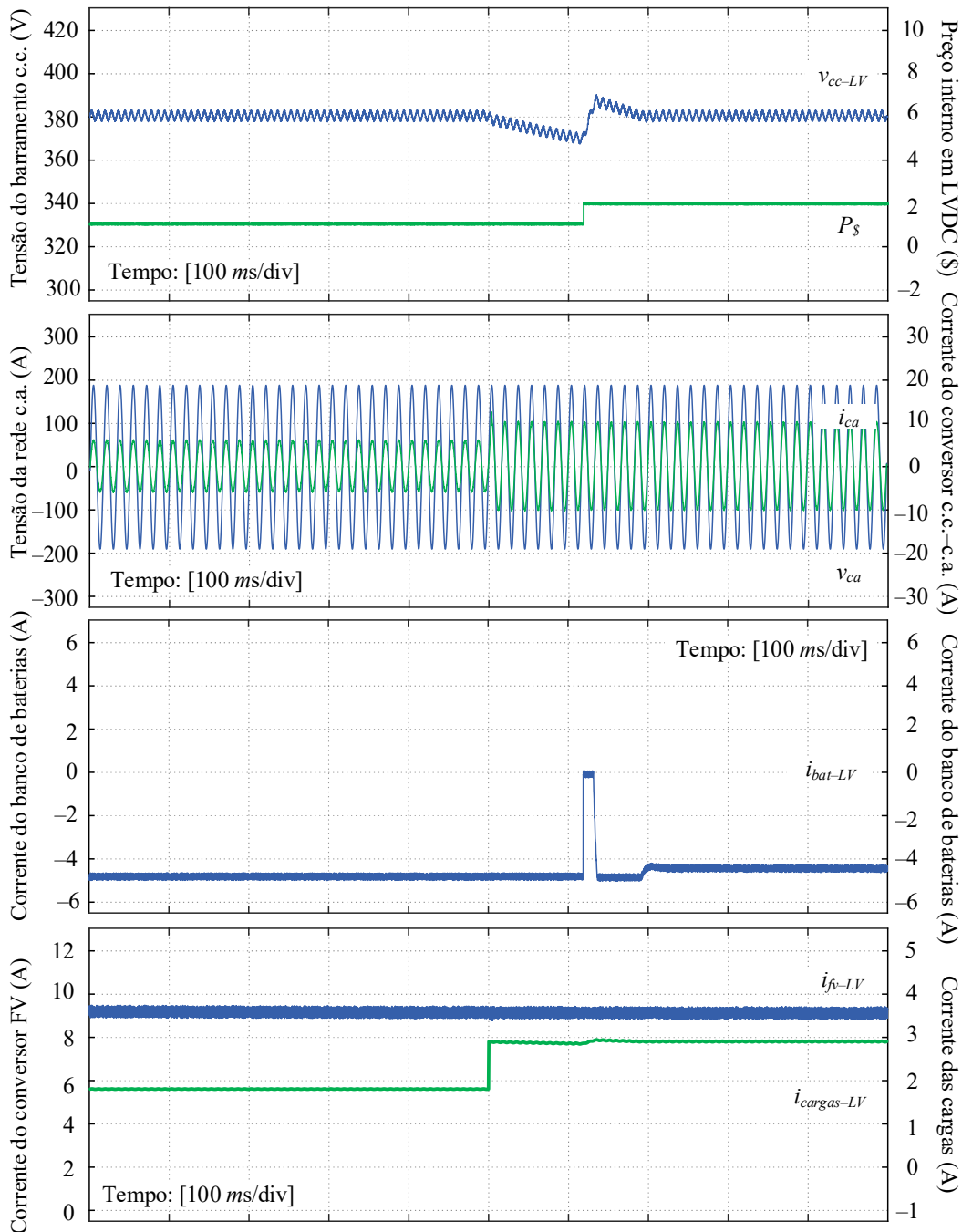
No segundo ensaio uma nova carga é conectada à nanorrede. Para este caso, uma nova MPR deve ser definida: considerando que o preço limite de compra para a carga é igual a \$5, o resultado é semelhante a MRP da carga de menor prioridade ( $MRP_{carga-BP}$ ):

$$\begin{aligned} \mathbf{pvec} &= [\$-1 \quad \$0 \quad \$1 \quad \$2 \quad \$3 \quad \$4 \quad \$5 \quad \$6 \quad \$7 \quad \$8] \\ MRP_{carga-BP2}(7) &= [-2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad \mathbf{20} \quad 0 \quad 0 \quad 0] \end{aligned} \quad (4.3)$$

Após a inicialização do barramento c.c., o preço é estável em \$1. Isso significa que, ao ser conectada à nanorrede, a nova carga opera em modo (-2), ligada com potência nominal. A

potência nominal da carga é igual a 500 W. Na Figura 4.4 são apresentados os resultados de simulação.

Figura 4.4 – Resultados de simulação para a conexão de carga à nanorrede: tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ); corrente do conversor c.c.-c.a. ( $i_{ca}$ ); tensão da rede c.a. ( $v_{ca}$ ); preço interno ( $P_s$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-LV}$ ); corrente das baterias ( $i_{bat-LV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-LV}$ ).



Fonte: autoria própria.



Quando a carga é ligada, ocorre uma variação negativa de tensão no barramento c.c., sinalizando um aumento de preço. Quando o preço é igual a \$2, o conversor bidirecional controla a corrente das baterias em modo (-1). Nesta situação a corrente de carga das baterias é zerada e posteriormente reduzida em relação a corrente nominal, para contribuir com o controle de tensão do barramento c.c. em LVDC. Isso é coerente com o conceito de preços porque a energia disponível na nanorrede foi reduzida com a demanda das cargas. Portanto, a bateria deve ser recarregada com limitação de potência.

Aqui é possível verificar uma característica importante da estratégia de gerenciamento de potência baseada em preços: na ocorrência de um evento transitório, os controladores de tensão tendem a se opor as possíveis variações de tensão. Se a variação de tensão no barramento c.c. não for suficiente para sinalizar uma mudança de preços, significa que nenhuma alteração de modos de operação é necessária. Por outro lado, cada vez que a tensão do barramento c.c. cruza um limite de comparação o preço é atualizado e os estados de operação da nanorrede são alterados em função do preço.

#### 4.3.1.3 Simulação 3: Adição de novas fontes à nanorrede

No terceiro teste, é considerada a adição de uma nova fonte à nanorrede. Para avaliar o compartilhamento de potência entre diferentes elementos reguladores de tensão, arbitrariamente, é definida a  $MRP_{Bid}$ , com preços limites de compra e venda igual a \$1. O resultado é que o novo elemento atua em modo (-1/1) a um mesmo preço que o conversor c.c.-c.a., assim como apresentado na relação (4.4).

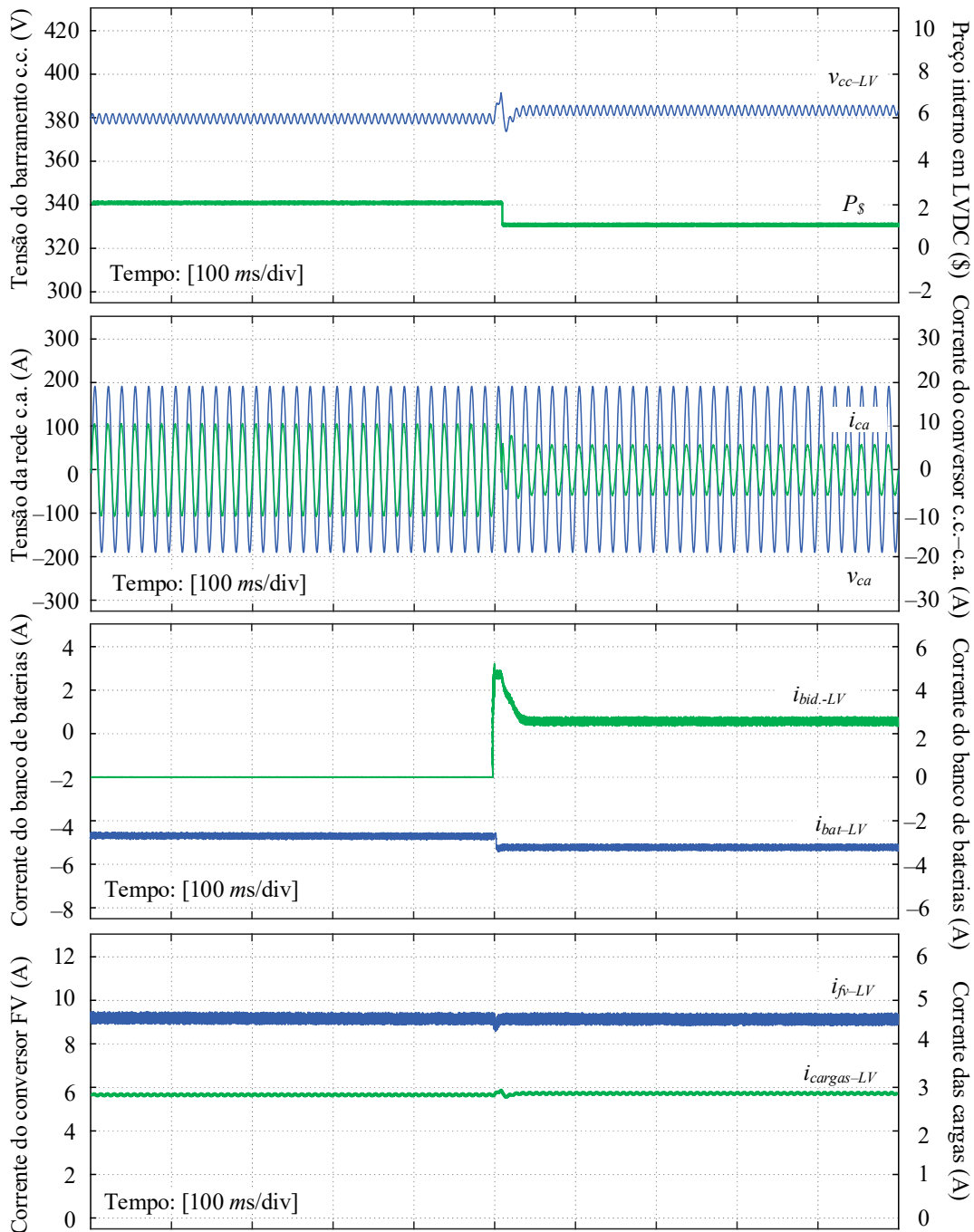
$$\begin{aligned}
 \mathbf{pvec}_{LV} &= [ \$-1 \quad \$0 \quad \$1 \quad \$2 \quad \$3 \quad \$4 \quad \$5 \quad \$6 \quad \$7 \quad \$8 ] \\
 MRP_{rede-ca} &= [ -2 \quad -2 \quad \mathbf{11} \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 ] \\
 MRP_{Bid} &= [ -2 \quad -2 \quad \mathbf{11} \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 ]
 \end{aligned} \quad (4.4)$$

O novo elemento trata-se de um conversor c.c.-c.c. bidirecional de 1 kW, com as mesmas especificações do carregador de baterias apresentado na Tabela 4.1 (5,2 A/ 192 V). O resultado da conexão do conversor à nanorrede é apresentado na Figura 4.5.

Inicialmente, o preço interno do barramento em LVDC é igual a \$2, de acordo com o resultado do ensaio anterior. Isso significa que, ao ser ligado, o conversor bidirecional é conectado com potência nominal, operando em modo (2). Após a conexão do novo elemento à nanorrede, é verificada uma elevação transitória de tensão no barramento c.c., reduzindo o preço interno de \$2 para \$1. Nesta situação, ambos conversores, c.c.-c.a. e bidirecional c.c.-

c.c., atuam em modo compartilhamento de potência (*droop*), regulando a tensão do barramento c.c. em, aproximadamente, 380 V.

Figura 4.5 – Resultados de simulação para a conexão de uma nova fonte à nanorrede: tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ); corrente do conversor c.c.-c.a. ( $i_{ca}$ ); tensão da rede c.a. ( $v_{ca}$ ); preço interno ( $P_s$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-LV}$ ); corrente das baterias ( $i_{bat-LV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-LV}$ ).



Fonte: autoria própria.

De acordo com os resultados de simulação, é possível verificar que o gerenciamento de potência se comportou de maneira adequada, conforme as MRPs dimensionadas em (4.2). Os resultados de simulação corroboram os principais conceitos da estratégia de gerenciamento de potência, incluindo a sinalização do barramento c.c. e a ideia de preços e, principalmente, as malhas de controle para os conversores de interface com a nanorrede. Para validar experimentalmente os resultados de simulação em tempo real, um protótipo da nanorrede descrita na Figura 4.2 foi construído em laboratório.

### **4.3.2 Resultados experimentais para o gerenciamento de potência em LVDC**

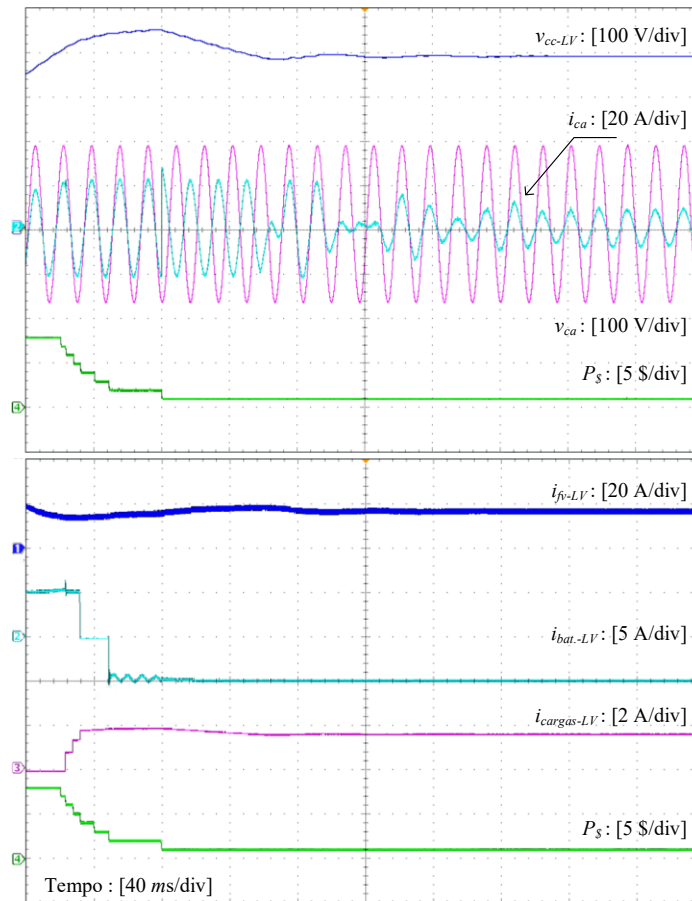
Para ilustrar a aplicação do gerenciamento em um sistema real, os conversores de potência foram construídos em laboratório. As MRPs em (4.2) foram implementadas no processador TMSF28379D. O DSP executa as leituras de tensão e corrente e realiza os cálculos necessários para os controladores primários. A bancada experimental foi utilizada para validar o gerenciamento de potência para uma ampla faixa de condições de operação, incluindo ensaios de longa duração como variações do estado de carga das baterias e diferentes tarifas da rede pública de distribuição. A obtenção dos resultados experimentais foi realizada através de dois osciloscópios sincronizados, de modelo DPO4034, do fabricante Tektronix.

#### *4.3.2.1 Ensaio 1: Inicialização do sistema com alta disponibilidade de energia*

Para validar os resultados de simulação, o primeiro ensaio realizado considera a inicialização da nanorrede. O cenário considerado inclui as baterias com alto estado de carga, rede elétrica e geração FV, condição semelhante ao teste realizado na simulação em tempo real.

Com preço interno igual a \$8, todas as fontes são inicializadas com potência nominal e as cargas são mantidas desligadas. O resultado experimental é apresentado na Figura 4.6. Com preço igual a \$8 nenhuma das fontes está habilitada a controlar a tensão do barramento c.c., O resultado é uma sobre-elevação transitória de tensão do barramento c.c. durante a inicialização do sistema. Semelhante ao resultado de simulação, o preço interno é reduzido de acordo com a sinalização do barramento c.c., permitindo ligar as cargas gerenciadas. A carga de maior prioridade é ligada com preço igual a \$6, de média prioridade em \$5, e a carga de menor prioridade é ligada quando o preço interno é igual a \$4.

Figura 4.6 – Resultado experimental para a inicialização do sistema com alta disponibilidade de energia: tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ); corrente do inversor ( $i_{ca}$ ); tensão da rede c.a. ( $v_{ca}$ ); preço interno ( $P_s$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-LV}$ ); corrente do banco de baterias ( $i_{bat-LV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-LV}$ ).



Fonte: autoria própria.

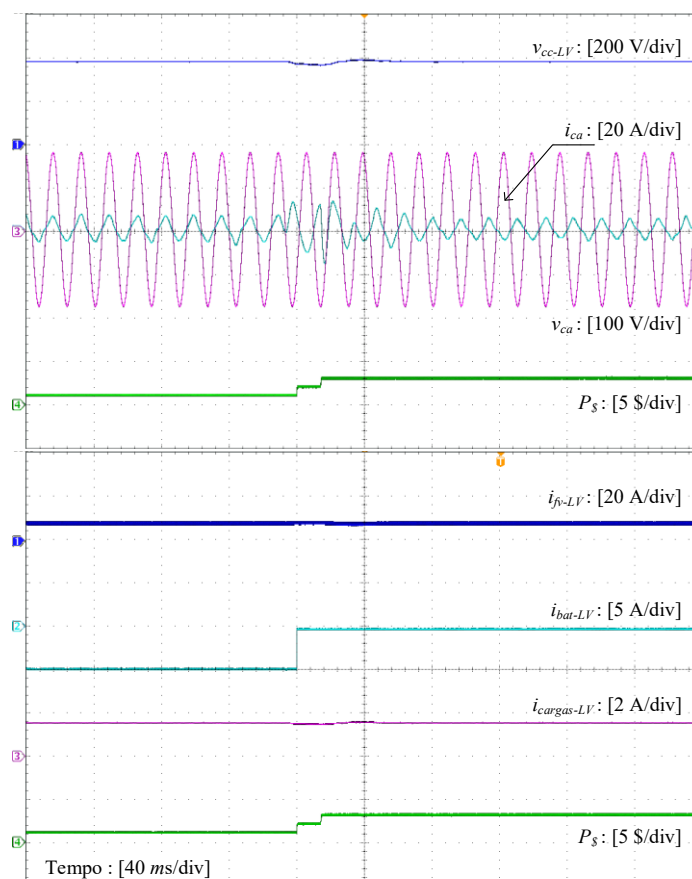
Em regime permanente, o preço estável é igual a \$1. O resultado é que o conversor c.c.-c.a. deve atuar em modo *droop* (1), para controlar a tensão do barramento c.c. em 380 V. A partir dos resultados experimentais é possível verificar que tanto na simulação com o Typhoon-HIL 602+, quanto nos testes realizados em laboratório, foi possível obter resultados semelhantes considerando as MRPs para o gerenciamento de nanorrede. Na sequência, serão apresentados os resultados experimentais para as variações de condições de operação dos principais elementos da nanorrede.

#### 4.3.2.2 Ensaio 2: mudança de tarifa da rede elétrica de barata para intermediária

No segundo ensaio, é verificada a resposta do sistema para a mudança de preço da rede elétrica, que passa da condição de operação barata para intermediária. Nesta situação, o

conversor c.c.-c.a. deixa de controlar a tensão do barramento c.c., com preço \$1 porque a segunda linha da  $MRP_{rede-ca}$  deve ser utilizada. Com a mudança na condição de operação da rede o conversor c.c.-c.a. deixa de atuar em modo *droop* para operar como inversor, no modo (-2). Isso resulta em uma variação negativa de potência. Durante o período transitório, a tensão do barramento c.c. cruza duas tensões de comparação (372 V e 364 V). Isso significa que o preço aumenta de \$1 para \$3. O resultado experimental é apresentado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Resultados experimentais para a mudança de tarifa barata para intermediária: tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ); corrente do inversor ( $i_{ca}$ ); tensão da rede c.a. ( $v_{ca}$ ); preço interno ( $P_S$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-LV}$ ); corrente do banco de baterias ( $i_{bat-LV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-LV}$ ).



Fonte: autoria própria.

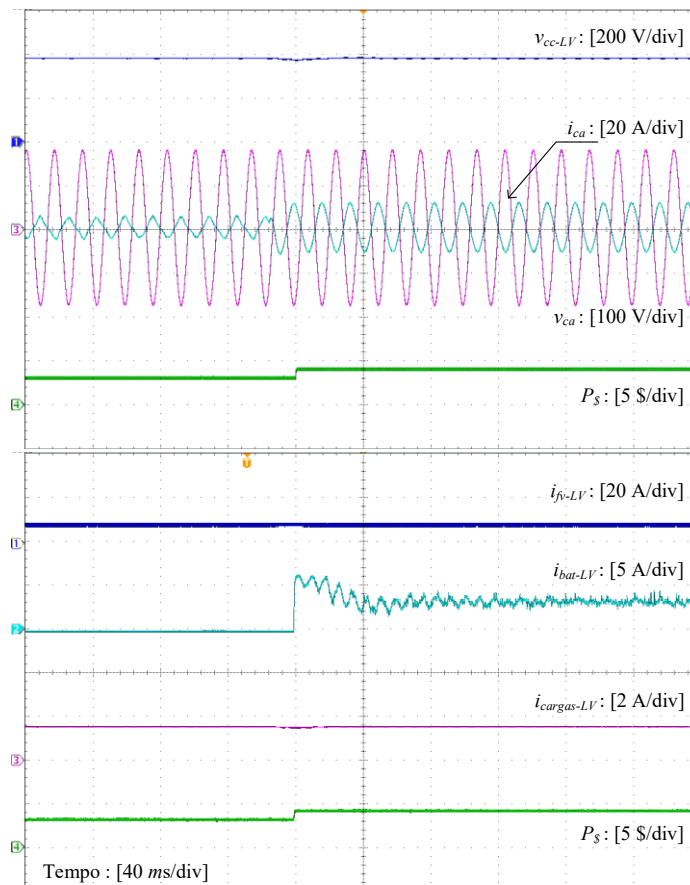
Durante a variação transitória de preço, o banco de baterias tende a assumir o controle de tensão em modo (-1). Com preço igual a \$2, o carregador de baterias tem ação de controle saturada em 0 A. Isso contribui para que o preço aumente de \$2 para \$3 mantendo as baterias desligadas (0). Em regime permanente, o preço é estável em \$3 e a tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ) é novamente controlada pelo conversor c.c.-c.a. em modo (11). Note que a variação do

preço real de energia resultou em um aumento do preço interno. Isso é coerente com a ideia de preços porque o maior custo de importação restringe a disponibilidade de energia à nanorrede.

#### 4.3.2.3 Ensaio 3: mudança de tarifa da rede elétrica de intermediária para cara

No terceiro ensaio, é verificado a resposta do gerenciador de potência para a situação em que a tarifa da rede passa da condição intermediária para cara. Nesta condição de operação, a terceira linha da  $MRP_{rede-ca}$  de (4.3) deve ser considerada. O resultado experimental é apresentado na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Resultados experimentais para a mudança de tarifa intermediária para cara: tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ); corrente do inversor ( $i_{ca}$ ); tensão da rede c.a. ( $v_{ca}$ ); preço interno ( $P_S$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-LV}$ ); corrente do banco de baterias ( $i_{bat-LV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-LV}$ ).



Fonte: autoria própria.

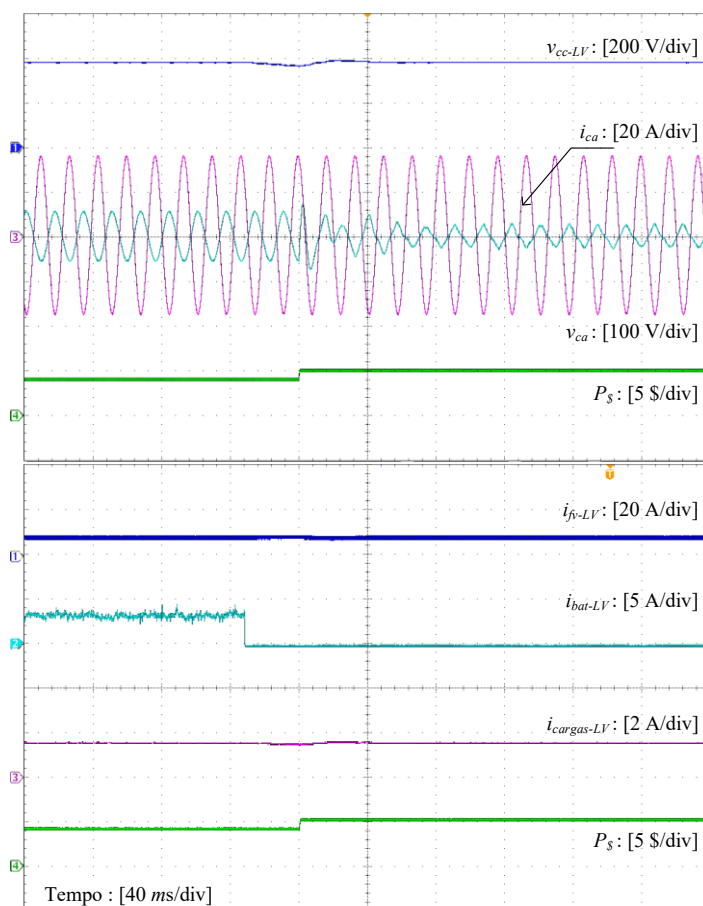
Com a nova mudança tarifária o preço interno aumenta uma unidade. Isso torna atrativa a venda de energia das baterias. Em regime permanente o preço é estável em \$4 e o carregador

de baterias assume o controle de tensão do barramento c.c., portanto deve atuar em modo *droop* (1) descarregando o banco de baterias. Neste caso, o conversor c.c.-c.a. opera como inversor, vendendo energia para a rede c.a. (-2). Esse resultado é coerente com as MRPs em (4.3).

#### 4.3.2.4 Ensaio 4: redução do estado de carga das baterias

Neste ensaio, é considerada a redução do estado de carga das baterias. Com preço interno igual a \$4, o banco de baterias é descarregado em modo (1) porque a primeira linha da  $MRP_{bat}$  de (4.3) é considerada. Entretanto, quando o estado de carga é reduzido, o conversor bidirecional deve operar em modo (-1), de acordo com a segunda linha da  $MRP_{bat}$ . O resultado experimental é apresentado na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Resultados para a redução do estado de carga das baterias: tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ); corrente do inversor ( $i_{ca}$ ); tensão da rede c.a. ( $v_{ca}$ ); preço interno ( $P_S$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-LV}$ ); corrente do banco de baterias ( $i_{bat-LV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-LV}$ ).



Fonte: autoria própria.

Quando a redução do estado de carga das baterias é sinalizada para o gerenciador de potência, a ação de controle do conversor c.c.-c.c. bidirecional é saturada em 0 A. Isso permite que a tensão do barramento c.c. cruze um limite de comparação, aumentando o preço para \$5. Com o preço estável em \$5, o conversor c.c.-c.a. passa a controlar a tensão do barramento c.c. em modo *droop* (11). Note que, inicialmente, com alta disponibilidade de energia o preço calculado é igual a \$1. Com a sequência de mudanças de condições de operação e redução da energia armazenada na nanorrede, o preço é estável em \$5. Isso significa que a formação de preços é coerente com a escassez de energia na nanorrede.

#### 4.3.2.5 *Ensaio 5: recarga do banco de baterias*

No último ensaio realizado para o sistema em LVDC, é considerada uma situação de recarga do banco de baterias. Para que isso aconteça, o preço interno deve ser reduzido, permitindo que as baterias comprem energia da nanorrede. Essa condição ocorre quando a tarifa da rede c.a. passa de cara para intermediária, aumentando a disponibilidade de energia. O resultado experimental é apresentado na Figura 4.10.

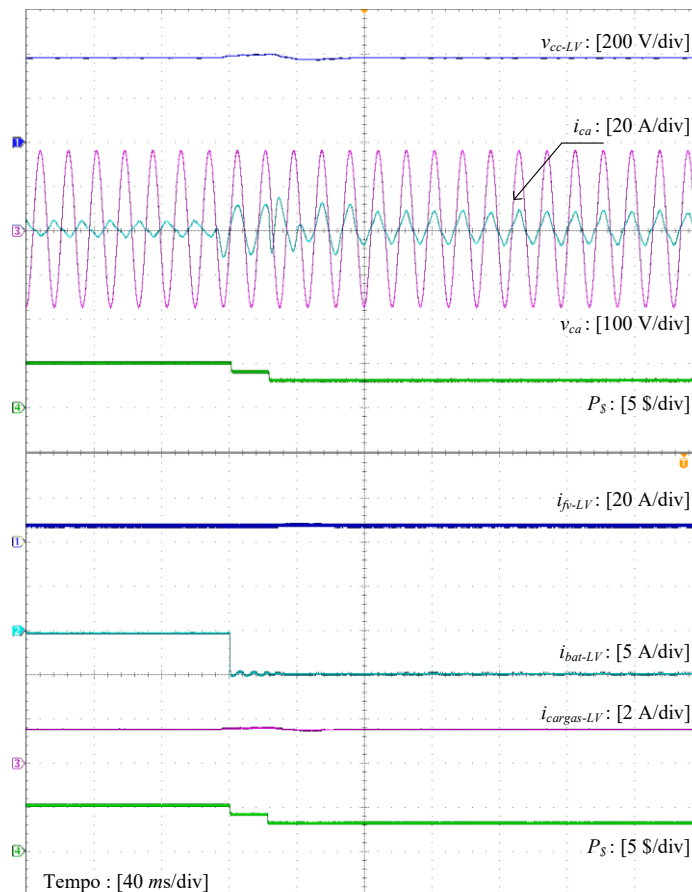
Quando a condição de operação da rede c.a. é alterada para intermediária, o preço interno reduz instantaneamente de \$5 para \$4. Nesta condição de operação, o carregador de baterias deve controlar a tensão do barramento c.c. em modo (-1). Isso é coerente com as MRPs apresentadas em (4.2). Entretanto, de acordo com o resultado experimental, a ação de controle do conversor bidirecional satura em -5 A. Isso permite que o preço seja novamente reduzido, estabilizando em \$3. Nesta condição de operação, o conversor c.c.-c.a. volta a controlar a tensão do barramento em modo (11).

Apesar de que o mesmo elemento atua como regulador de tensão, é necessário observar que a variação transitória resultante da mudança de condição de operação permitiu que o preço interno seja atualizado. Isso ocorre porque as MRPs, semelhante a uma máquina de estados, são baseadas em eventos discretos. Entretanto, nenhum modelo complexo é necessário nesta proposta, porque os modos de operação dos elementos são atribuídos individualmente para cada conversor, de acordo com a parametrização dos preços.

De acordo com os resultados experimentais, em todos os ensaios, o gerenciador de potência (MRPs) garantiu a estabilidade da nanorrede em resposta ao preço. Entretanto, ainda é necessário avaliar a resposta do gerenciamento quando considerada a aplicação à nanorredes com barramentos interconectados. Na subseção seguinte, serão apresentados os resultados experimentais, considerando a adição do barramento auxiliar em extra-baixa tensão.



Figura 4.10 – Resultados experimentais de recarga do banco de baterias: tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ); corrente do inversor ( $i_{ca}$ ); tensão da rede c.a. ( $v_{ca}$ ); preço interno ( $P_S$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-LV}$ ); corrente do banco de baterias ( $i_{bat-LV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-LV}$ ).

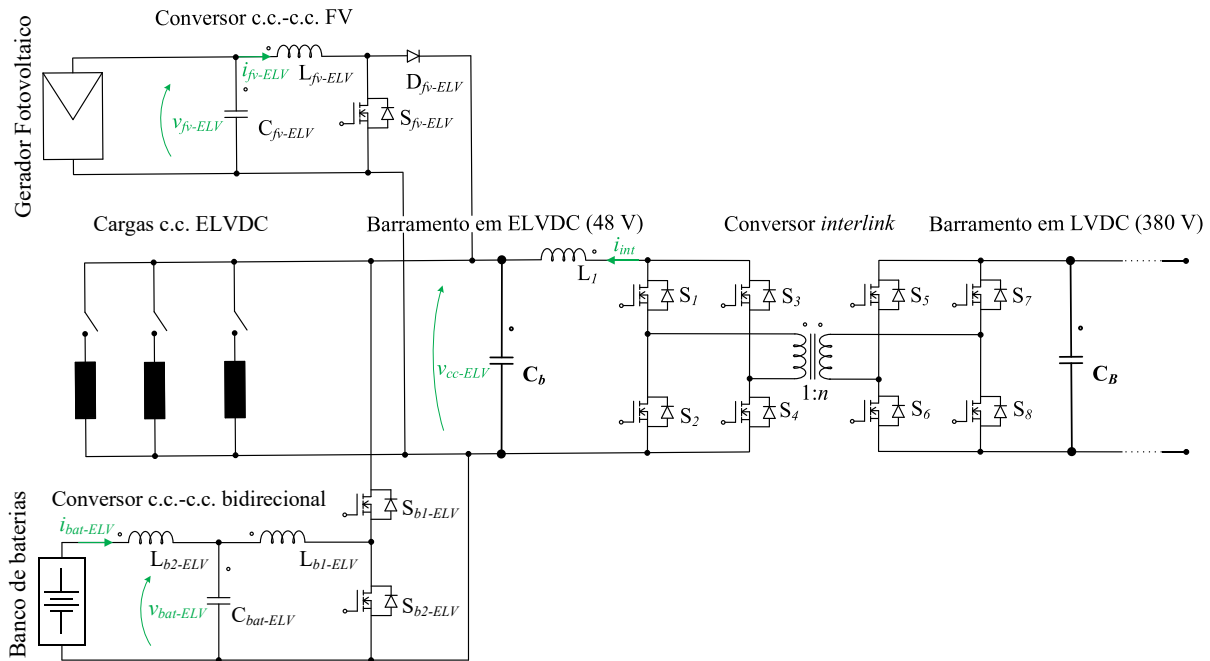


Fonte: autoria própria.

#### 4.4 GERENCIAMENTO DO SISTEMA EM ELVDC

Na segunda etapa da proposta, o gerenciamento de potência é dimensionado para o sistema em extra-baixa tensão. Na Figura 4.11, são apresentados os elementos da nanorrede em ELVDC, incluindo um gerador fotovoltaico (350 Wp), um banco de baterias (36V/160 Ah) e cargas, também divididas em: baixa prioridade (BP-ELV) em 100 W, média prioridade (MP-ELV) de 150 W e alta prioridade (AP-ELV) de 250 W. Para a implementação do conversor *interlink* é utilizado um conversor bidirecional isolado, do tipo CF-DAB. A potência nominal do conversor *interlink* é igual a 500 W.

Figura 4.11 – Diagrama de potência da nanorrede c.c. em ELVDC.



Fonte: autoria própria.

Os controladores primários em extra-baixa tensão, seguem as especificações da Tabela 4.3, que inclui as frequências de corte dos controladores de tensão (24 Hz) e corrente (240). De forma complementar a Tabela 4.3, na Tabela 4.4, são apresentados os coeficientes de decaimento para os conversores em extra-baixa tensão.

Tabela 4.4 – Principais parâmetros de implementação dos controladores primários em ELVDC.

Parâmetro	Descrição	Valor
$m_{fv}$	Coefficiente de decaimento do conversor FV	0,33
$m_{bat}$	Coefficiente de decaimento do carregador de baterias	0,23
$m_{int}$	Coefficiente de decaimento do conversor <i>interlink</i>	0,23

Os parâmetros de implementação dos conversores são inclusos no Apêndice B, enquanto na Tabela 4.5, é apresentada a parametrização do gerenciamento de potência para o dimensionamento das MRPs.

Tabela 4.5 – Parametrização dos preços máximos de compra e preços mínimos de venda para os elementos da nanorrede em extra-baixa tensão.

Elemento	Condições de operação	Limite de compra ( $P_s$ )	Limite de venda ( $P_s$ )
1. Gerador Fotovoltaico	1 –	–	\$0
2. Conversor <i>interlink</i>	1 –	\$1	\$1
3. Banco de Baterias	1 SoC (75–100%)	\$2	\$4
	2 SoC (50-75%)	\$3	\$5
	3 SoC (0-50%)	\$4	\$6
4. Carga de baixa prioridade	1 –	\$5	–
5. Carga de média prioridade	1 –	\$6	–
6. Carga de alta prioridade	1 –	\$7	–

O dimensionamento das MRPs é realizado de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 3. É necessário notar que, utilizando o gerenciamento de forma distribuída, não há um número excessivo de modos de operação. Ambos os sistemas LVDC e ELVDC incluem 6 elementos distintos. Considerando o modelo com máquinas de estados centralizadas, resultam 52 estados para o sistema com 5 elementos. Na proposta com MRPs, ambos os sistemas são gerenciados com um vetor de preços de \$–1 a \$8, ou seja,  $\mathbf{pvec}_{ELV}$  [1 x 9]. Os resultados das MRPs para os elementos em extra-baixa tensão são apresentados em (4.5).

$$\begin{aligned}
 \mathbf{pvec}_{ELV} &= [ \$-1 \quad \$0 \quad \$1 \quad \$2 \quad \$3 \quad \$4 \quad \$5 \quad \$6 \quad \$7 \quad \$8 ] \\
 \mathbf{MRP}_{fv} &= [ \quad 0 \quad \mathbf{1} \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 ] \\
 \mathbf{MRP}_{int.} &= [ -2 \quad -2 \quad \mathbf{11} \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 ] \\
 \mathbf{MRP}_{carga-BP} &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad \mathbf{20} \quad 0 \quad 0 \quad 0 ] \\
 \mathbf{MRP}_{carga-MP} &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad \mathbf{20} \quad 0 \quad 0 ] \\
 \mathbf{MRP}_{carga-AP} &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad \mathbf{20} \quad 0 ] \\
 \mathbf{SoC}[\text{alto}] &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -\mathbf{1} \quad 0 \quad \mathbf{1} \quad 2 \quad 2 \quad 2 \quad 2 ] \\
 \mathbf{MRP}_{bat} \quad \mathbf{SoC}[\text{interm.}] &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -\mathbf{1} \quad 0 \quad \mathbf{1} \quad 2 \quad 2 \quad 2 ] \\
 \mathbf{SoC}[\text{baixo}] &= [ -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -2 \quad -\mathbf{1} \quad 0 \quad \mathbf{1} \quad 2 \quad 2 ]
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Em relação as tensões de comparação, são utilizados os valores apresentados na Tabela 4.7, obtidos de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 3.

Tabela 4.6 – Tensões de comparação para o barramento em extra-baixa tensão.

Sobre-elevação	Tensões de comparação								
Positiva (V)	49	50	51	52	53	54	55	56	57
Negativa (V)	47	46	45	44	43	42	41	40	39

#### 4.4.1 Resultados experimentais para o gerenciamento de potência do barramento auxiliar em ELVDC

Para verificar a proposta de gerenciamento de potência em extra-baixa tensão, as MRPs em (4.5) foram implementadas no DSP TMSF28379D. Para organizar os resultados experimentais, cada cenário é apresentado separadamente nas subseções (4.4.1.1) e (4.4.1.2). Os ensaios apresentados são complementares aos resultados do sistema em LVC.

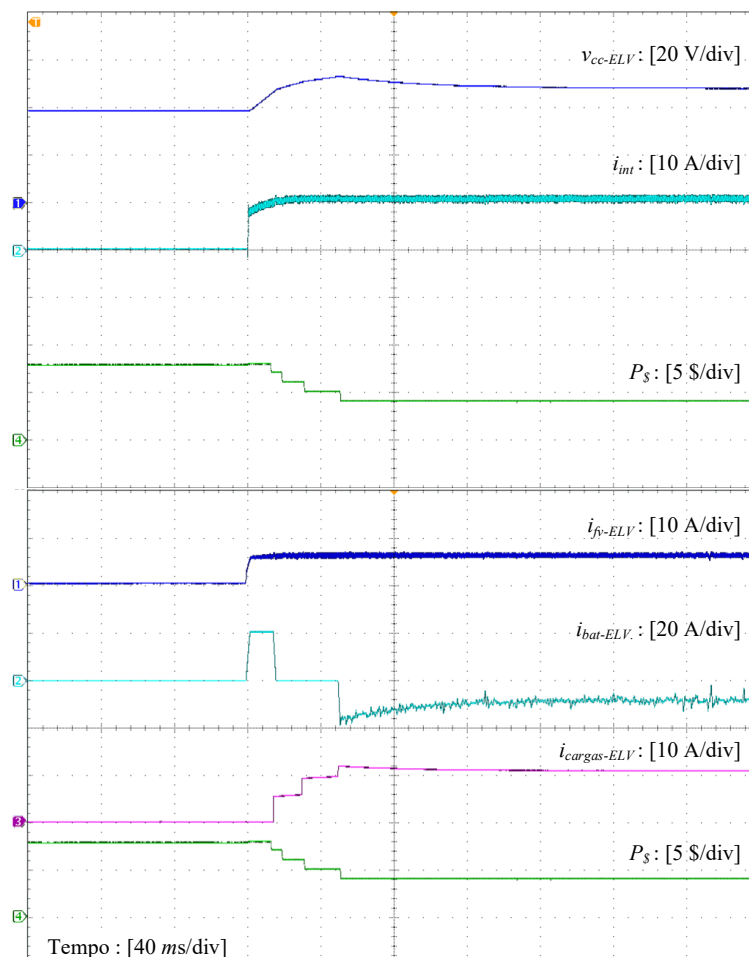
##### 4.4.1.1 Ensaio 1: Inicialização do sistema com baixa disponibilidade de energia

Inicialmente, o teste de inicialização do sistema é executado considerando uma situação em que há pouca energia disponível em ELVDC. A geração fotovoltaica apresenta baixos níveis de produção e as baterias apresentam estado de carga reduzido, ou seja, a terceira linha da MRP (6) em (4.5) é considerada. Esta situação foi escolhida para representar um caso diferente da inicialização do sistema em LVDC. Os resultados experimentais são apresentados na Figura 4.12. O sistema é inicializado com preço interno igual a \$8 para manter as cargas desligadas. De forma coerente com as MRPs apresentadas em (4.5), o sistema fotovoltaico, banco de baterias e conversor *interlink* são inicializados em modo (2), atuando em potência nominal.

O preço inicial se mantém constante até que a tensão do barramento ultrapasse a primeira tensão de comparação (49 V). À medida que a tensão do barramento c.c. sinaliza variações positivas de tensão, o preço é reduzido permitindo que as cargas sejam acionadas: a carga de maior prioridade é ligada com preço \$6, média prioridade com preço \$5 e a carga de menor prioridade com preço igual a \$4.

Em relação ao banco de baterias, com a redução do preço de \$7 para \$6, o conversor bidirecional opera em modo *droop* (1). Entretanto, de acordo com o resultado experimental, a corrente do banco de baterias é saturada em 0 A. Posteriormente o conversor é desligado com preço igual a \$5, sendo ligado novamente em modo *droop* quando o preço é estável em \$4, carregando o banco de baterias, porque o modo (-1) é definido na  $MRP_{bat}$  em (4.5).

Figura 4.12 – Resultado experimentais para a inicialização do sistema em ELVDC, considerando baixa energia disponível na nanorede: tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-ELV}$ ) em 48 V; corrente do conversor *interlink* ( $i_{int.}$ ); preço interno ( $P_S$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{pv-ELV}$ ); corrente do banco de baterias ( $i_{bat-ELV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-ELV}$ ).

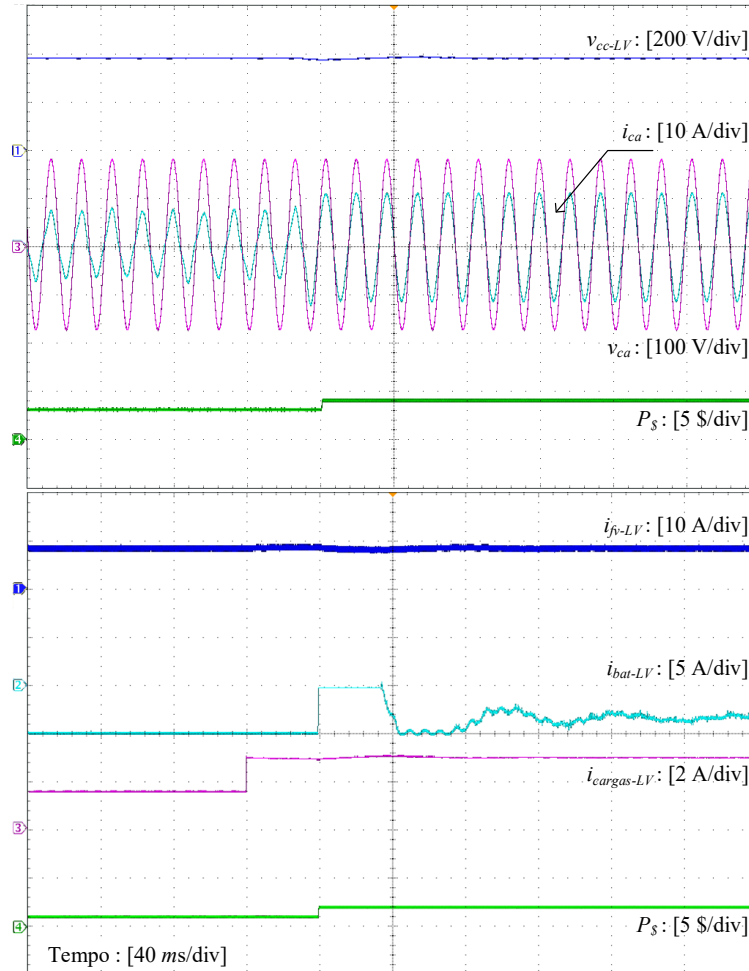


Fonte: autoria própria.

Aqui é necessário notar como a disponibilidade de energia influencia na formação de preços. A inicialização do sistema em LVDC, o resultado experimental resultou em um preço interno igual a \$1 porque o cenário considerado inclui fontes com alta disponibilidade de energia (alta geração fotovoltaica, e baterias com alto estado de carga). Por outro lado, a inicialização em ELVDC resultou em um preço interno igual a \$4 porque neste ensaio é considerado o cenário em que pouca energia está disponível para o barramento auxiliar.

Para avaliar a influência da inicialização do sistema em ELVDC sobre a formação de preços do barramento principal, foram verificadas as principais variáveis do sistema em LVDC. O resultado é apresentado na Figura 4.13.

Figura 4.13 – Resultados experimentais do distúrbio de potência em LVDC, causado pela inicialização do barramento auxiliar em ELVDC: tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-LV}$ ); corrente do inversor ( $i_{ca}$ ); tensão da rede c.a. ( $v_{ca}$ ); preço interno ( $P_S$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-LV}$ ); corrente do banco de baterias ( $i_{bat-LV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-LV}$ ).



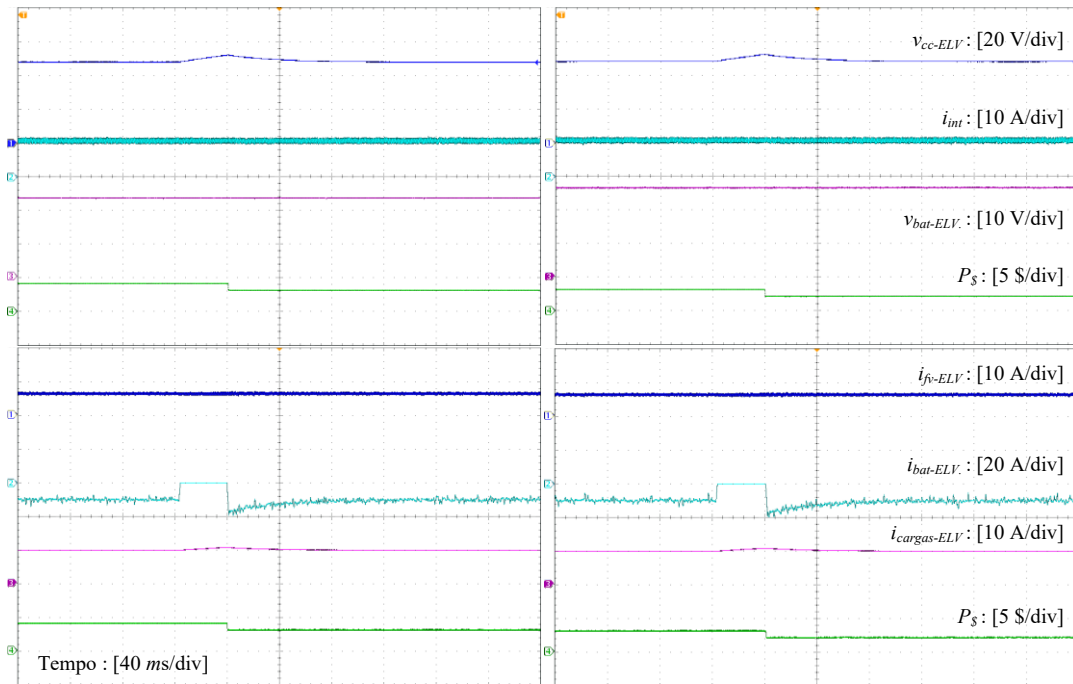
Fonte: autoria própria.

Com a inicialização do barramento em 48 V, o conversor *interlink* atua com potência nominal. Isso resulta em um distúrbio de potência de aproximadamente 500 W no barramento em LVDC. Neste ensaio, é considerado que o preço inicial é igual a \$3 e o conversor de tensão c.c.-c.a. atua como retificador controlando a tensão do barramento em 380 V. Com a inicialização do sistema em ELVDC, a tensão do barramento c.c. sofre uma variação transitória de tensão, aumentando o preço em uma unidade. Com preço igual a \$4, o banco de baterias atua em modo *droop* (-1) para garantir o equilíbrio de potência. Isso é coerente com as curvas teóricas de inicialização do sistema, consideradas no Capítulo 3.

#### 4.4.1.2 Ensaio 2: Carga completa do banco de baterias

O último ensaio é realizado para verificar as variações de preço com a elevação do estado de carga das baterias. Neste caso, é considerado que o banco de baterias tem estado de carga reduzido e o preço inicialmente é estável em \$4, conforme ensaio anterior. Os resultados são apresentados na Figura 4.14 que considera os intervalos de tempo amostrados de um ensaio de longa duração.

Figura 4.14 – Resultado experimentais para a carga completa do banco de baterias em ELVDC: tensão do barramento c.c. ( $v_{cc-ELV}$ ) em 48 V; corrente do conversor *interlink* ( $i_{int}$ ); preço interno ( $P_S$ ); corrente do gerador fotovoltaico ( $i_{fv-ELV}$ ); corrente do banco de baterias ( $i_{bat-ELV}$ ); corrente das cargas c.c. ( $i_{cargas-ELV}$ ).



Fonte: autoria própria.

Com baixo estado de carga, o banco de baterias controla o barramento c.c. em modo de carga (-1), no primeiro intervalo de tempo. Para permitir que todas as cargas permaneçam ligadas, o conversor *interlink* atua com potência nominal em modo (2).

No segundo momento, o banco de baterias se encontra em estado de carga intermediário. A mudança de modo de operação é sinalizada para o gerenciamento de potência, porque a segunda linha da MRP (6) deve ser considerada. Neste instante, o carregador de baterias bidirecional é desligado momentaneamente permitindo que o preço seja reduzido em 1 unidade. Com preço igual a \$3, o carregador de baterias atua novamente em modo (-1).

Resultado semelhante é verificado no último intervalo de tempo, quando o carregador de baterias é desligado. O resultado é que há uma nova elevação de tensão no barramento c.c., reduzindo o preço de \$3 para \$2. Isso permite que o banco de baterias seja totalmente carregado com a sequência do ensaio. Isso é coerente com a ideia do gerenciamento de potência em resposta ao preço, porque à medida que o estado de carga das baterias se eleva, a disponibilidade de energia à nanorrede aumenta, portanto, o preço interno deve ser reduzido proporcionalmente.

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES EM RELAÇÃO AS DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA

De acordo com os resultados de simulação e experimentais apresentados ao decorrer deste capítulo, diferentes estratégias de gerenciamento de potência foram comparadas em relação à estrutura de comunicação, controle e desvios de tensão no barramento c.c., assim como em relação à critérios como complexidade de implementação, flexibilidade para adicionar novos elementos à nanorrede e graus de liberdade para a otimização do sistema. Na Tabela 4.8, são resumidos os principais critérios de comparação, incluindo controladores *droop*, *droop* hierárquico, máquinas de estados e MRPs.

Os controladores *droop* são a estratégia de compartilhamento de potência mais comum na literatura (MOKHTAR *et al.*, 2019), (LI *et al.*, 2021), (HUANG *et al.*, 2021). As principais vantagens dos controladores *droop* é a funcionalidade *plug-and-play* e o grau de liberdade para adaptar os coeficientes de decaimento em tempo real. Por outro lado, considerando ganhos de decaimento fixos, ou sistemas sem um *link* de comunicação, não é possível operar em um ponto ótimo, do ponto de vista de processamento de potência, porque todos os elementos devem contribuir para a regulação de tensão do barramento c.c..

De acordo com os resultados experimentais e de simulações apresentados ao decorrer deste trabalho, as estratégias de gerenciamento de potência foram comparadas em relação aos erros de tensão. Sem um *link* de comunicação, controladores *droop* com ganhos fixos resultam em um maior erro de tensão (9~12 V). Para reduzir o desvio de tensão, é possível adicionar uma malha externa de controle em abordagens hierárquicas. Entretanto, um *link* de comunicação é necessário, mesmo que com baixa largura de banda (DRAGIECEVIC *et al.*, 2016a), (ESPINA *et al.*, 2020), (NGUYEN, GUERRERO, GRIEPENTROG, 2020).

No trabalho de Nguyen (2019), além da redução do desvio de tensão, o controle *droop* hierárquico é associado a sinalização do barramento c.c. para adaptar os ganhos de decaimento



(*m*). Posteriormente, este trabalho foi publicado em (NGUYEN, GUERRERO, GRIEPENTROG, 2020). Entretanto, é necessário notar que quando os controladores *droop* são considerados de maneira direta, não é possível definir prioridades para as cargas e fontes. Isso significa que devido a malha de compartilhamento de potência, todos os elementos devem contribuir para a regulação de tensão do barramento.

Em uma máquina de estados, é possível definir com precisão quando um elemento (fonte ou carga) deve ser desligado, ou ligado. Isso significa que quando fontes de baixo custo de produção estão disponíveis, como geradores renováveis, é possível desligar fontes de maior custo, como baterias com baixo estado de carga, ou fontes não-renováveis, como os geradores a diesel, por exemplo. Apesar de que isso garante a operação inteligente da nanorrede, máquinas de estados requerem um *link* de comunicação com alta largura de banda, e por se tratar de um sistema baseado em regras, a flexibilidade de se adicionar novos elementos e escalonar a nanorrede reduz significativamente (BELLINASO; SCHWERTNER; MICHELS, 2016), (SANDGANI; SIROUSPOUR, 2018), (BUERGUER *et al.*, 2019), (DEHGHANPOUR; NEHRIR, 2019), (HERATH *et al.*, 2019), (PAPARI, *et al.*, 2019), (LEE, KIM, KIM, MOON, 2020), (BHOSALE, GUPTA, AGARWAL, 2021) (HUANG *et al.*, 2021).

Em relação a otimização do sistema, os ganhos de decaimento (*m*) são um importante grau de liberdade para a otimização do gerenciamento de potência baseado em *droop* (MOKHTAR *et al.*, 2019), (LI *et al.*, 2021), (HUANG *et al.*, 2021). Entretanto, mesmo em abordagens adaptativas é necessário um *link* de comunicação para analisar as condições gerais de operação da nanorrede. Por esse motivo, comumente controladores *droop* e *droop hierárquico* são associados a estratégias de gerenciamento de energia, em uma camada superior de controle (MOKHTAR, MAREI, EL-SATTAR, 2019), (LEE, KIM, KIM, MOON, 2020), (BHOSALE, GUPTA, AGARWAL, 2021) (HUANG *et al.*, 2021), (LI *et al.*, 2021).

Em máquinas de estados, um maior número de parâmetros é disponível para a parametrização do sistema, incluindo a priorização de cargas, preço tarifário da rede elétrica c.a., gerenciamento de baterias, entre outros. Por outro lado, utilizando controladores centralizados, a parametrização do gerenciamento deve ser realizada de maneira *off-line*, porque a nanorrede deve ser remodelada para a atualização das regras (GUERRERO *et al.*, 2013), (DIAZ *et al.*, 2017), (BELLINASO *et al.*, 2021). Isso ocorre porque o dimensionamento do gerenciador de potência é definido pela verificação de todas as possibilidades de mudanças de modos de operação da nanorrede (SCHWERTNER *et al.*, 2013), (SANDGANI; SIROUSPOUR, 2018), (DEHGHANPOUR; NEHRIR, 2019), (HERATH *et al.*, 2019), (PAPARI, *et al.*, 2019), (GHASAEI *et al.*, 2021).

Tabela 4.8 – Comparação entre diferentes estratégias de gerenciamento de potência.

Parâmetros	Controladores <i>droop</i>	Hierárquico	Máquinas de estados	MRPs
Parâmetros de otimização	Ganho de decaimento [ $m$ ] de cada conversor	Ganho de decaimento [ $m$ ] de cada conversor	Múltiplos, incluindo o preço da energia, SoC e outros	Ganho de decaimento [ $m$ ], OCs e parametrização dos preços (prioridades).
Flexibilidade para adicionar novos elementos	<i>Plug-in-play</i> , sendo necessário ajustar o ganho de decaimento.	<i>Plug-in-play</i> , sendo necessário ajustar o ganho de decaimento	Todo o sistema deve ser remodelado	<i>Plug-in-play</i> , ajustando o ganho $m$ e parametrizando a MRP de cada elemento
Banda de comunicação	–	Baixa largura de banda	Alta largura de banda	Baixa largura de banda
Variáveis transmitidas	–	Desvio de tensão ( $\Delta v$ )	Modos de operação ou referências de potência	Desvio de tensão ( $\Delta v$ ) e o preço interno ( $P_s$ ) de cada barramento
Tolerância contra falhas de comunicação	–	Alta, porque apenas o desvio de tensão ( $\Delta v$ ) é aumentado	Nenhum	Médio, além do maior desvio de tensão o sistema deve operar sem MRPs
Tolerância contra erros de medida	Alto	Alto	Baixo	Alto
Controle de tensão do barramento c.c.	Indireto devido a malha de compartilhamento de potência	Indireto	Controle direto de tensão	Indireto, devido a associação com controladores <i>droop</i> a nível primário
Desvio de tensão no barramento c.c.*	Alto: 12~16 V	Baixo: 0~2 V	Nulo: 0 V	Baixo: 0~2 V
Dinâmica de controle do barramento c.c.	Resposta transitória lenta	Resposta transitória lenta	Resposta transitória rápida	Maior tempo de resposta devido a sinalização do barramento c.c.
Despacho de potência de cada elemento	Não-controlado, devido ao compartilhamento de potência	Não-controlado, devido ao compartilhamento de potência	Controlado de acordo com a arquitetura do sistema	Controlado pela programação das MRPs
Operação dos elementos com alto custo de produção	Não são desligados, operando com ganhos fixos	Desligados apenas quando os níveis de potência da nanorrede são conhecidos (gerenciamento de energia)	Desligados automaticamente quando necessário	Desligados automaticamente em resposta ao preço
Otimização geral da nanorrede	Nunca alcançado devido ao compartilhamento de potência	Operação em ponto não-ótimo, devido a malha de compartilhamento de potência	Dependente do modelo pré-determinado	Possível, otimizando os ganhos $m$ e a parametrização das MRPs

Em Schwertner *et al.* (2013) um sistema fotovoltaico *off-grid* é controlado por máquina de estados centralizada, modelada com 18 estados de operação. Nesta referência, o dimensionamento da máquina de estados inclui um gerador fotovoltaico, um banco de baterias e uma única carga gerenciada. Quando considerada a adição de novos elementos, a abordagem por máquinas de estados torna-se extensa e complexa, porque um número elevado de estados de operação é necessário. Esta máquina de estados, inicialmente, não utiliza a ideia de preço interno, porém, o controle deste mesmo sistema foi publicado em Bellinaso *et al.* (2016) pelo método de resposta ao preço.

No caso das matrizes de resposta ao preço, o dimensionamento do gerenciador de potência depende apenas do número de preços e não necessariamente do número de elementos do sistema. Isso simplifica de maneira considerável o projeto do gerenciador, porque os modos de operação são definidos através de conceitos simples de compra e venda (CARVALHO *et al.*, 2021a). Em Bellinaso *et al.* (2016), nenhuma metodologia é apresentada para o cálculo das matrizes de resposta ao preço. Entretanto, na sequência do trabalho, em Bellinaso (2017) é apresentada uma metodologia para parametrização do gerenciador. Neste trabalho, as MRPs foram aplicadas para um sistema de maior porte, adicionando ao sistema fotovoltaico e banco de baterias, a rede elétrica c.a. e três cargas gerenciáveis.

Considerando a implementação do gerenciador de potência em DSP, nesta tese o método de gerenciamento por resposta ao preço é sintetizado através de algoritmos de cálculo das MRPs. O resultado foi publicado em Bellinaso *et al.* (2021), Carvalho *et al.* (2021a) e Carvalho *et al.* (2021b). Isso permite que o gerenciamento de potência baseado em preços seja aplicado a outros sistemas, simplesmente parametrizando as prioridades de cada elemento em resposta ao preço. Tanto em Bellinaso (2017) quanto em Bellinaso *et al.* (2016), o gerenciamento é desenvolvido para sistemas com um único barramento c.c. centralizado. Portanto, ambos trabalhos não envolvem questões como estruturas de comunicação, múltiplos barramentos e compartilhamento de potência.

Neste trabalho, o problema de gerenciamento de potência é abordado para nanorredes com barramentos interconectados. A proposta é operar com o gerenciamento de forma distribuída. Isso permite que cada subsistema seja gerenciado de maneira independente, calculado preços individuais cada barramento interconectado. A principal diferença para a proposta inicial de Bellinaso *et al.* (2016), é que não é necessária uma estrutura de comunicação entre os subsistemas (LVDC e ELVDC). Isso permite aumentar a modularidade do sistema, sem extensas redes de comunicação, o que é coerente com a ideia de nanorredes, que

naturalmente são divididas em subsistemas, devido às limitações de potência em extra-baixa tensão.

Característica semelhante é apresentada em Nguyen (2019) e Nguyen *et al.* (2020), onde dois barramentos interconectados são gerenciados com controle *droop* hierárquico. Apesar de que nesta proposta, é possível adicionar com facilidade novos barramentos e novos conversores à nanorrede, o gerenciamento de potência ainda é fortemente dependente dos controladores *droop* a nível secundário.

Nesta tese os controladores *droop* são utilizados apenas à nível primário. Isso significa que o gerenciamento de potência efetivo é uma função das MRPs, enquanto os controladores *droop* são necessários apenas para aumentar flexibilidade de projeto do gerenciador. Isso é importante porque na proposta original de gerenciamento em resposta ao preço, o controle de tensão é uma restrição de projeto. Ao associar controladores *droop* a ideia de matrizes de resposta ao preço, diferentes características potências são aproveitadas de ambas as soluções, incluindo: *i*) funcionalidade *plug-and-play*; *ii*) priorização de cargas e geração; *iii*) maior liberdade para otimização do sistema devido ao conceito de preços, prioridades e ganhos de decaimento (*m*); e *iv*) implementação do sistema de forma distribuída.

#### 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foi apresentada a descrição da nanorrede e da estratégia de gerenciamento de potência, considerando nanorredes com múltiplos barramentos e diferentes condições de operação. A formação de diferentes preços para cada subsistema foi avaliada através de simulação em tempo real e resultados experimentais. De acordo com os resultados, o gerenciamento de potência garantiu a estabilidade da nanorrede para diferentes condições de operação, incluindo variação de estado de carga das baterias, priorização de cargas e diferentes tarifas de energia para a rede pública de distribuição.

Considerando a implementação do gerenciamento de forma distribuída, à medida que um novo barramento é inicializado, apenas o preço interno do barramento principal é recalculado, e o gerenciamento de potência opera em função do novo preço. Adicionalmente, a associação com controladores *droop* a nível primário permite escalonar a nanorrede para sistemas maiores, sem que todo o gerenciamento de potência seja reprojetoado.



## 5 CONCLUSÕES

Esta tese propôs contribuições relacionadas ao desenvolvimento e controle de nanorredes c.c. com barramentos interconectados. Para o gerenciamento de potência são propostas matrizes de resposta ao preço associadas a duas malhas de compartilhamento de potência à nível primário. Isso permite superar limitações de abordagens usuais como máquinas de estados e controladores *droop*. O sistema desenvolvido inclui um barramento c.c. em baixa tensão (380 V) e um barramento em extra-baixa tensão (48 V) conectados por meio de um conversor *interlink*. Adicionalmente o sistema inclui geradores fotovoltaicos, bancos de baterias e cargas com diferentes níveis de prioridades.

No Capítulo 2, foram apresentados os principais aspectos de controle de nanorredes, incluindo as estruturas de controle e estratégias de compartilhamento de potência. Em relação a implementação da nanorrede, as arquiteturas de redes c.c., c.a. e híbridas (c.c.-c.a.) são possíveis. Entretanto, a literatura atual é claramente favorável a sistemas c.c. em baixa potência, porque apresentam maior facilidade de integração com fontes renováveis e, atualmente, são identificadas uma série de cargas com características c.c. no atual sistema elétrico de potência. Embora grande parte dessas cargas opere com baixa tensão e, principalmente, extra-baixa tensão c.c., atualmente, são necessários vários estágios de conversão para o suprimento de energia às cargas. O número de etapas de processamento de potência justifica a implementação de sistemas com múltiplos barramentos. Desta forma, a revisão bibliográfica direciona o trabalho para o gerenciamento de sistemas interconectados.

Com relação aos aspectos de controle e gerenciamento de potência, estruturas centralizadas e descentralizadas incluem máquinas de estado, controladores *droop*, e controle hierárquico. Por outro lado, à medida que a nanorrede aumenta e novos barramentos são adicionados ao sistema, as estratégias de controle tornam-se pouco eficientes, complexas, e muitas vezes incluem extensas redes de comunicação. Isso indica que ainda falta um método abrangente para as questões de gerenciamento de potência, quando considera a natureza distribuída de nanorredes com múltiplos barramentos.

No Capítulo 3 foi apresentada a proposta de gerenciamento de potência. Em relação a estrutura de controle, cada subsistema interconectado atua de forma independente, resultando em diferentes níveis de descentralização:

- i.* A nível primário, cada elemento de potência atua de maneira independente em resposta ao preço. Isso significa que, para adicionar novos elementos à nanorrede,

é necessário apenas parametrizar uma MRP e um respectivo coeficiente de decaimento (*droop*).

- ii.* A nível de gerenciamento de potência, cada subsistema é gerenciado de acordo com a sinalização dos barramentos interconectados. Isso é possível porque diferentes preços são formados para cada barramento e sinalizados de maneira local para os conversores de interface.

No Capítulo 4 foi apresentada a estrutura da nanorrede, resultados de simulação e resultados experimentais para a estratégia de gerenciamento de potência. Os resultados são utilizados para validar as malhas de controle e compartilhamento de potência bem como a estratégia de gerenciamento. É necessário enfatizar que esta proposta é aplicada ao gerenciamento de nanorredes que, naturalmente, estão relacionadas a instalações autossuficientes em energia.

O conceito de preço interno foi aplicado para avaliar a energia disponível em cada barramento interconectado. Portanto, é possível definir com precisão quando um elemento de potência deve operar em modo compartilhamento de potência (*droop*), em potência nominal, ou mesmo desligado, quando necessário. O resultado é que é possível evitar que todos os elementos atuem em modo *droop* durante todo o tempo. Isso permite priorizar cargas e desligar fontes com alto custo de produção quando outras fontes de geração estão disponíveis.

Adicionalmente, devido as malhas de compartilhamento de potência a nível primário, não há restrições de controle em relação a tensão do barramento c.c.. Isso permite aumentar a modularidade da nanorrede no que diz respeito a interação com novos elementos. Além disso, os coeficientes de decaimento podem ser utilizados como um parâmetro de otimização do sistema em tempo real. Como a otimização não foi um tema da tese, neste trabalho, os controladores *droop* foram implementados com ganhos fixos. Desta forma, são sugeridos como temas para trabalhos futuros os itens apresentados na sequência.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o prosseguimento do trabalho, são propostos os seguintes temas de pesquisa:

- i.* Avaliar a interação do gerenciamento de potência com uma camada superior de controle para o gerenciamento de energia a longo prazo;
- ii.* Adaptar os coeficientes de decaimento em resposta ao preço;

- iii.* Otimização do sistema em relação aos coeficientes de decaimento e matrizes de resposta ao preço, para obter benefícios como redução de custos, aumento de eficiência, entre outros.
- iv.* Avaliar critérios de estabilidade que permitam prever as limitações de controle quando considerado o escalonamento da nanorrede para um número maior de elementos.
- v.* Avaliar critérios de segurança, assim como normatização para nanorredes com múltiplos barramentos.
- vi.* Avaliar a resposta do gerenciamento de potência para diferentes tipos de carga, incluindo cargas indutivas, cargas de potência constante e outras.





## PUBLICAÇÕES RELACIONADAS A TESE

Os resultados alcançados durante o curso deste trabalho de doutorado foram publicados em conferências e periódicos internacionais conforme listado a seguir.

Artigos publicados em periódicos:

CARVALHO, E. L.; FELIPE, C. A.; BELLINASO, L. V.; CARDOSO, R. MICHELS, L.; **Asymmetrical-PWM DAB Converter with extended ZVS/ZCS Range and Reduced Circulating Current for ESS Applications**. IEEE Transaction on Power Electronics, 2021.

BELLINASO, L. V.; CARVALHO, E. L.; CARDOSO, R. MICHELS, L.; **Price-Response Matrices Design Methodology for Electrical Energy Management Systems Based on DC Bus Signalling**. Energies, 2021.

CARVALHO, E. L.; BELLINASO, L. V.; FELIPE, C. A.; CARDOSO, R. MICHELS, L.; **Gerenciamento de Potência Baseado em Vetores de Resposta ao Preço para o Controle de Nanorredes CC**. Revista Eletrônica de Potência (Impresso), 2021.

CARVALHO, E. L.; BELLINASO, L. V.; CARDOSO, R. MICHELS, L.; **Distributed Price-Based Power Management for Multi-buses DC Nanogrids EEMS**. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022.

Artigos publicados em congressos e conferências:

CARVALHO, E. L.; BELLINASO, L. V.; CARDOSO, R.; MICHELS, L. **Price-Based DC Bus Signaling for Nanogrids Power Management**. In IEEE Brazilian Power Electronics Conference. Anais...João Pessoa, 2021.

CARVALHO, E. L.; BELLINASO, L. V.; CARDOSO, R.; MICHELS, L. **Experimental Evaluation of a Dual DC Buses Nanogrid with Interlink Converter**. In IEEE Brazilian Power Electronics Conference. Anais...João Pessoa, 2021.

CARVALHO, E. L.; FELIPE, C. A.; MICHELS, L.; BELLINASO, L. V.; CARDOSO, R. **Analytical Methodology to Design Third-Order Filter (LCL) for Batteries Chargers**. In IEEE International Conference on Industrial Technology. Anais...Buenos Aires, 2020.

CARVALHO, E. L.; MENEGHETTI, L. H.; BELLINASO, L. V.; CARDOSO, R.; MICHELS, L. **Bidirectional Interlink Converter for Bipolar DC Microgrids**. In IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America. Anais...Gramado, 2019.

CARVALHO, E. L.; LAZZARI, T.; VIEIRA, R. P.; MICHELS, L.; PINHEIRO, H. **A Comparison of Different Modulations Applied to a Multilevel Flying Capacitor Inverter.** *In* 11th Seminar on Power Electronics and Control. Anais...Santa Maria, 2018.

CARVALHO, E. L.; TAMBARA, R. V.; CARDOSO, R.; MICHELS, L. **A Discrete-Time Robust Adaptive Controller Applied to a Bidirectional Isolated Converter.** *In* 11th Seminar on Power Electronics and Control. Anais...Santa Maria, 2018.

## REFERÊNCIAS

- AGUERO, J. R.; KHODAEI, A. Grid Modernization, DER Interaction and Utility Business Models – Trends and Challenges, **IEEE Power and Energy Magazine**, vol. 16, no. 2, p. 112–119, 2018.
- AILEE, G.; TSCHUDI, W. Edison Redux: 380 Vdc Brings Reliability and Efficiency to Sustainable Data Centers, **IEEE Power and Energy Magazine**, vol. 10, no. 6, p. 50-59, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410 Instalações Elétricas de Baixa Tensão**, 2008.
- AUGUSTINE, S.; MISHRA, M. K.; LAKSHMINARASAMMA, N. Adaptive Droop Control Strategy for Load Sharing and Circulating Current Minimization in Low-Voltage Standalone DC Microgrid, **IEEE Transaction on Sustainable Energy**, vol. 6, no. 1, p. 132–141, 2015.
- BAGHAEE, H. R.; MIRSALEM, M. GHAREHPETIAN, G. B. Performance Improvement of Multi-DER Microgrid for Small- and Large-Signal Disturbance and Nonlinear Loads: Novel Complementary Control Loop and Fuzzy Controller in a Hierarchical Droop-Based Control Scheme, **IEEE Systems Journal**, vol. 12, no. 1, p. 444-451, 2018.
- BELLINASO, L. V.; SCHWERTNER, C. D.; MICHELS, L. Price-Based Power Management of Off-Grid Photovoltaic Systems with Centralized DC Bus, **IET Renewable Power Generation**, vol. 10, no. 8, p. 1132–1139, 2016.
- BELLINASO, L. V. **Inversores Fotovoltaicos Conectados à Rede com Armazenamento de Energia – Classificação, Recomendações Técnicas e Gerenciamento**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.
- BELLINASO, L. V.; CARVALHO, E. L.; CARDOSO, R.; MICHELS, L. Price-Response Matrices Design Methodology for Electrical Energy Management Systems Based on DC Bus Signaling, **Energies**, vol. 14, no. 6, 2021.
- BHOSALE, R.; GUPTA, R.; AGARWAL, V. A Novel Control Strategy to Achieve SOC Balancing for Batteries in a DC Microgrid Without Droop Control, **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 57, no. 4, p. 4196-4206, 2021.
- BOROYEVICH, D.; CVETKOVIC, I.; BURGOS, R.; DONG, D. Intergrid: A Future Electronic Energy Network, **IEEE Journal of Emerging Topics in Power Electronics**, vol. 1, no. 3, p. 127–138, 2013.
- BRYAN, J.; DUKE, R.; ROUND, S. Decentralized Generator Scheduling in a Nanogrid Using DC Bus Signaling, **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, vol. 2, s. n., p. 977-982, 2004.
- BUERGER, R.; SANTOS, F. C.; SINTONIO, M. S.; MARTINS, D. C.; COELHO, R. F. Controle e Análise de Estabilidade de Conversores CC-CC em Modo de Compartilhamento de Potência, **Revista Eletrônica de Potência (Impresso)**, vol. 24, no. 1, p. 56-65, 2019.
- BURMESTER, D.; RAYUDU, R.; SEAH, W.; AKYINYELE, D. A Review of Nanogrid Topologies and Technologies, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 67, s. n., p. 760-775, 2017.
- BURMESTER, D. **Nanogrid topology, control and interactions in a microgrid structure**. Tese (Doutorado em Ciência da Computação), Victoria University of Wellington, 2018.

CARVALHO, E. L.; BELLINASO, L. V.; CARDOSO, R.; MICHELS, L. **Bidirectional Interlink Converter for Bipolar DC Microgrids**, in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America*. Anais... Gramado, 2019.

CARVALHO, E. L.; BELLINASO, L. V.; FELIPE, C. A.; CARDOSO, R.; MICHELS, L. Gerenciamento de Potência Baseado em Vetores de Resposta ao Preço para o Controle de Nanorredes, **Revista Eletrônica de Potência** (Impresso), 2021a.

CARVALHO, E. L.; BELLINASO, L. V.; CARDOSO, R.; MICHELS, L. **Price-Based DC Bus Signaling for Nanogrids Power Management**, in *IEEE Brazilian Power Electronics Conference*. Anais... João Pessoa, 2021b.

CARVALHO, E. L.; FELIPE, C. A.; BELLINASO, L. V.; CARDOSO, R.; MICHELS, L. Asymmetrical-PWM DAB Converter with Extended ZVS/ZCS Range and Reduced Circulating Current for ESS Applications, **IEEE Transaction on Power Electronics**, vol. 36, no. 11, p. 12990-13001, 2021c.

CHEN, F.; CHEN, M.; LI, Q. MENG, K.; GUERRERO, J. M.; ABBOTT, D. Multiagent-Based Reactive Power Sharing and Control for Islanded Microgrids, **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, vol. 7, no. 3, p. 1232–1244, 2016.

CHOI, W.; LEE, W.; HAN, D. SARLIOGLU, B. New Configuration of Multifunctional Grid-Connected Inverter to Improve Both Current-Based and Voltage-Based Power Quality, **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 54, no. 6, p. 6374-6382, 2018.

CVETKOVIC, I. **Modeling, Analysis and Design of Renewable Energy Nanogrid Systems**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2010.

CVETKOVIC, I. **Modeling and Control of Voltage-Controlling Converters for Enhanced Operation of Multi-Source Power Systems**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2018.

DEGHANPOUR, K.; NEHRIR, H. An Agent-Based Hierarchical Bargaining Framework for Power Management of Multiple Cooperative Microgrids, **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol. 10, no. 1, p. 514-512, 2019.

DRAGICEVIC, T.; GUERRERO, J. M.; VASQUEZ, J. C.; SKRLEC, D. Supervisory Control of an Adaptive-Droop Regulated DC Microgrid With Battery Management Capability, **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 29, no. 2, p. 695-706, 2014.

DRAGICEVIC, T.; LU, X.; VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M. DC Microgrids – Part I: A Review of Control Strategies and Stabilization Techniques, **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 31, no. 7, p. 4876-4891, 2016a.

DRAGICEVIC, T.; LU, X.; VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M. DC Microgrids – Part II: A Review of Power Architectures, Applications, and Standardization Issues, **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 31, no. 5, p. 3528-3549, 2016b.

GANESHAN, A. **Hydrogen energy storage system for nanogrid**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), RMIT University, Melbourne, 2020.

GHASAEI, A.; ZHANG, Z. J.; WONHAM, W. M.; IRAVANI, R. **A Discrete-Event Supervisory Control for the AC Microgrid**, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 2, p. 663-675, 2021.

GUERRERO, J. M.; LOH, P. C.; LEE, T. CHANDORKAR, M. Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids – Part I: Decentralized and Hierarchical Control, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 60, no. 4, p. 1254–1262, 2013a.

GUERRERO, J. M.; LOH, P. C.; LEE, T. CHANDORKAR, M. Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids – Part II: Power quality, Energy Storage and AC/DC Microgrids, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 60, no. 4, p. 1263–1270, 2013b.

GUERRERO, J. M.; VASQUEZ, J. C.; MATAS, J.; VICUNA, L. G.; CASTILLA, M. Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids – A General Approach Toward Standardization, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 58, no. 1, p. 158–172, 2011.

GUO, L.; ZHANG, S.; LI, Z.; LI, X.; LI, Y. W.; WANG, C.; FENG, Y. Stability Analysis and Damping Enhancement Based on Frequency-Dependent Virtual Impedance for DC Microgrids, **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, vol. 5, no. 1, p. 338–350, 2017.

HAN, Y.; LI, H.; SHEN, P.; COELHO, E. A. A.; GUERRERO, J. M. Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids, **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 32, no. 3, p. 2427–2451, 2017.

HENDERSON, M. I.; NOVOSEL, D.; CROW, D. Electric Power Grid Modernization Trends, Challenge and Opportunities, **IEEE Power and Energy Magazine**, 2017.

HEMALATHA, S. **Modeling and Power Control Strategy of the Nanogrid for a Standalone Rustic Electrification**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) Faculty of Electrical Engineering Anna University, Chennai, 2018.

HERATH, P. U.; FUSCO, V.; CÁCERES, M. N.; VENAYAGAMOORTHY, G. K.; SQUARTINI, S.; PIAZZA, F.; CORCHADO, J. M. Computational Intelligence-Based Demand Response Management in a Microgrid, **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 55, no. 1, p. 732–740, 2019.

HUANG, S.; WU, Q.; LIAO, W.; WU, G.; LI, X.; WEI, J. Adaptive Droop-Based Hierarchical Optimal Voltage Control Scheme for VSC-HVdc Connected Offshore Wind Farm, **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, vol. 17, no. 12, p. 8165–8176, 2021.

HU, J.; WU, J.; AI, X.; LIU, N. Coordinated Energy Management of Prosumers in a Distribution System Considering Network Congestion, **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol. 12, no. 1, p. 468–478, 2021.

INTERNATIONAL ELECTRICAL COMMISSION, **IEC 61975 LVDC distribution system up to 1500V**, 2010.

INTERNATIONAL ELECTRICAL COMMISSION, **IEC 61140 Protection against Electric Shock-Common Aspects for Installations and Equipment**, 2016.

INTERNATIONAL ELECTRICAL COMMISSION, **LVDC: Electricity for the 21<sup>st</sup> Century**, Geneva, 2017.

INTERNATIONAL ELECTRICAL COMMISSION, **IEC Low-voltage electrical installations – Part 8-2: Prosumer’s low-voltage electrical installations**, IEC Standard 60364-8-2, 2018.

IEEE STANDARDS ASSOCIATION, **IEEE 1709 Recommended Practice for 1 kV to 35 kV Medium-Voltage DC Power Systems on Ships**, 2010.

KAVIRI, S. M.; HAJEBRAHIMI, H.; POORALI, B.; PAHLEVANI, M.; JAIN, P. K.; BAKHSHAI, A. A Supervisory Control System for Nanogrids Operating in the Stand-Alone Mode, **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 36, no. 3, p. 2914-2931, 2021.

KIM, J.; CHOI, S.; CHO, B. H. Operation and Control Strategy of a New Hybrid ESS-UPS System, **IEEE Transaction on Power Electronics**, vol. 17, no. 1, p. 25-32, 2002.

KUMAR, D.; ZARE, F.; GHOSH, A. DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications and Standardizations Aspects, **IEEE Access**, vol. 5, p. 12230–12256, 2017.

LAI, J.; LU, X.; YU, X.; YAO, W.; WEN, J.; CHENG, S. Distributed Multi-DER Cooperative Control for Master-Slave-Organized Microgrid Networks with Limited Communication Bandwidth, **IEEE Transaction on Industrial Informatics**, vol. 15, no. 6, p. 3443-3456, 2019.

LASSETER, R. Microgrids: Distributed Power Generation, **IEEE Power Engineering Society**, vol. 1 p. 146–149, 2001.

LASSETER, R. Microgrids, **IEEE PES Winter Meeting**, vol. 1, p. 305-308, 2002.

LEE, J.; KIM, Y.; KIM, T.; MOON, S. Novel Droop Control of Battery Energy Storage Systems Based on Battery Degradation Cost in Islanded DC Microgrids, **IEEE Access**, vol. 8, p. 119337-119345, 2020.

LI, F.; LIN, Z.; QIAN, Z.; WU, J.; JIANG, W. A Dual-Window DC Bus Interacting Method for DC Microgrids Hierarchical Control Scheme, **IEEE Transaction on Sustainable Energy**, vol. 11, no. 2, p. 652-661, 2020.

LI, X.; GUO, L.; LI, T.; HONG, C.; ZHANG, Y.; GUO, Z. HUANG, D.; WANG, C. Flexible Interlinking and Coordinated Power Control of Multiple DC Microgrids Clusters, **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, vol. 9, no. 2, p. 904-915, 2018.

LI, Z.; CHAN, K. W.; HU, J.; GUERRERO, J. M. Adaptive Droop Control Using Adaptive Virtual Impedance for Microgrids with Variable PV Outputs and Load Demands, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 68, no. 10, p. 9630-9640, 2021.

LIU, S.; WANG, X.; LIU, P. X. Impact of Communication Delays on Secondary Frequency Control in an Islanded Microgrid, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 62, no. 4, p. 2021–2030, 2015.

LIU, Q.; CALDOGNETTO, T.; BUSO, S. Flexible Control of Interlinking Converters for DC Microgrids Coupled to Smart AC Power Systems, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 66, no. 5, p. 3477-3485, 2019.

LOTFI, H.; KHODAEI, A. AC Versus DC Microgrid Planning, **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol. 8, no. 1, p. 296-304, 2017.

MAHMOOD, H.; MICHAELSON, D.; JIANG, J. Reactive Power Sharing in Islanded Microgrids Using Adaptive Voltage Droop Control, **IEEE Transaction on Smart Grid**, vol. 6, no. 6, p. 3052-3060, 2015.

MENG, L.; SHAFIEE, Q.; TRECATE, G. F.; KARIMI, H.; FULWANI, D.; LU, X.; GUERRERO, J. M. Review on Control of DC Microgrids and Multiple Microgrid Clusters, **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, vol. 5, no. 3, p. 928-

948, 2017.

MOKHTAR, M.; MAREI, M. I.; EL-SATTAR, A. A. An Adaptive Droop Control Scheme for DC Microgrids Integrating Sliding Mode Voltage and Current Controlled Boost Converters, **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol. 10, no. 2, p. 1685-1693, 2019.

MORAIS, A. S.; LOPES, L. A. C. **Interlink Converter in DC Nanogrids and its Effect in Power Sharing Using Distributed control**, in 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Anais...Vancouver, 2016.

NASIRIAN, V.; SHAFIEE, Q.; GUERRERO, J. M.; LEWIS, F. L.; DAVOUDI, A. Droop-Free Distributed Control for AC Microgrids, **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 31, no. 2, p. 1600–1617, 2016.

NGUYEN, T. L. **A Control Strategy for Self-Sustained and Flexible DC Nanogrids**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação), Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, 2019.

NGUYEN, T. L.; GUERRERO, J. M.; GRIEPENTROG, G. A Self-Sustained and Flexible Control Strategy for Islanded DC Nanogrids without Communication Links, **IEEE Journal of Emerging and Select Topics in Power Electronics**, vol. 8, no. 1, p. 877-892, 2020.

NORDMAN, B.; CHRISTENSEN, K. **DC Local Power Distribution with Microgrids and Nanogrids**, in 1th International Conference on DC Microgrids. Anais...Atlanta, 2015.

OLIVARES, D.; MEHRIZI-SANI, A.; ETEMADI, A. H.; CANIZARES, C. A.; IRAVANI, R.; KAZERANI, M.; HAJIMIGAGHA, A. H.; GOMIS-BELLMUT, O. SAEEDIFARD, M.; PALMA-BEHNKE, R.; JIMENEZ-ESTEVEZ, G. A.; HATZIARGYRUOU, N. D. Trends in Microgrid Control, **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol. 5, no. 4, p. 1905–1919, 2014.

PAPADIMITRIOU, C. N.; ZOUNTOURIDOU, E. I.; HATZIARGYRIOU, N. D. Review of hierarchical control in DC microgrids, **Electric Power Systems Research**, vol. 122, p. 159–167, 2015.

PAPARI, B.; EDRINGTON, C. S.; BHATTACHARYA, I.; RADMAN, G. Effective Energy Management of Hybrid AC–DC Microgrids with Storage Devices, **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol. 10, no. 1, p. 193–203, 2019.

PARHIZI, S.; LOTFI, H.; KHODAEI, A.; BAHRAMIRAD, S. State of the Art in Research on Microgrids: A review, **IEEE Access**, vol. 3, s. no., p. 890-925, 2015.

SANDGANI, M. R.; SIROUSPOUR, S. Energy Management in a Network of Grid-Connected Microgrids/Nanogrids Using Compromise Programming, **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol. 9, no. 3, p. 2180–2191, 2018.

SANTOS NETO, P. J.; BARROS, T. A. S.; SILVEIRA, J. P. C.; RUPPERT FILHO, E.; VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M. Power management techniques for grid-connected DC microgrids: A comparative evaluation, **Applied Energy**, vol. 269, 115057, 2020.

SCHONBERGER, J.; DUKE R.; ROUND, S. D. DC-Bus Signaling: A Distributed Control Strategy for a Hybrid Renewable Nanogrid **IEEE Trans. on Industrial Electronics**, vol. 53, no. 5, p. 1453-1460, Outubro 2006.

SCHONBERGER, J. **Distributed Control of a Nanogrid Using DC Bus Signalling**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Eletrônica), University of Canterbury, Christchurch, 2005.



SCHWERTNER, C. D.; BELLINASSO, L. V.; HEY, H. L.; MICHELS, L. **Supervisory Control for Stand-Alone Photovoltaic Systems**, in 12th Brazilian Power Electronics Conference. Anais...Gramado, 2013.

SIEMENS. **The Smart Way HVDC plus – One Step Ahead**, *Siemens AG*, vol. único, Erlangen, 2011.

SILVA, W. W. A. G. **Desenvolvimento de métodos para controle distribuído em nanorredes c.c.: compartilhamento de potência e restauração de tensão**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

SONG, S.; MCCANN, R. A.; JANG, G. Cost-Based Adaptive Droop Control Strategy for VSC-MTDC system, **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 36, no. 1, p. 659-669, 2021.

SUN, K.; ZHANG, L.; XING, Y.; GUERRERO, J. M. A Distributed Control Strategy Based on DC Bus Signaling for Modular Photovoltaic Generation Systems with Battery Energy Storage, **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 26, no. 10, p. 3032-3045, 2011.

RADIMOV, N. **Modelling and Control of Inverters in a Single-Phase Nanogrid**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação), Carleton University, Ontario, 2020.

TAYAB, U. B.; ROSLAN, M. A. B., HWAI, L. J., KASHIF, M. A Review of Droop Control Techniques for Microgrid, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 76, p. 717-727, 2017.

TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRIGUEZ, P. **Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems**, *Wiley IEEE-Press*, 1ª Ed., Nova Jersey, 2011.

THALE, S. S.; WANDHARE, R. G.; AGARWAL, V. A Novel Reconfigurable Microgrid Architecture with Renewable Energy Sources and Storage, **IEEE Transactions on Industry Application**, vol. 51, no. 2, p. 1805–1816, 2015.

UNAMUNO, E.; BARRENA, J. A. Hybrid ac/dc Microgrids: Review and Classification of Control Strategies, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 52, p. 1123-1134, 2015.

VUYYURU, U.; MAITI, S. CHAKRABOTY, C. Active Power Flow Control Between DC Microgrids, **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol. 10, no. 5, p. 5712-5723, 2019.

WANG, L.; LAM, C.; WONG, M. Multifunctional Hybrid Structure of SVC and Capacitive Grid-Connected Inverter (SVC//CGCI) for Active Power Injection and Nonactive Power Compensation, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 66, no. 3, p. 1660–1670, 2019.

WERTH, A.; KITAMURA, N.; TANAKA, K. Conceptual Study for Open Energy Systems: Distributed Energy Network Using Interconnected DC Nanogrids, **IEEE Transaction on Smart Grid**, vol. 6, no. 4, p. 1621–1630, 2015.

WU, D.; TANG, F.; DRAGICEVIC, T.; GUERRERO, J. M.; VASQUEZ, J. C. Coordinated Control Based on Bus-Signaling and Virtual Inertia for Islanded DC Microgrids, **IEEE Transaction on Smart Grid**, vol. 6, no. 6, p. 2627–2638, 2015.

WU, X.; XU, Y.; HE, J.; GUERRERO, J. M.; LIU, C.; SCHNEIDER, K. P.; TON, D. T. A Two-Layer Distributed Cooperative Control Method for Islanded Networked Microgrid Systems, **IEEE Transaction on Smart Grid**, vol. 11, no. 2, p. 942-957, 2020.

## APÊNDICE A: ESPECIFICAÇÕES DA NANORREDE EM LVDC

Tabela A – Especificações dos principais componentes da nanorrede c.c. em LVDC.

Componentes	Especificações
Capacitor do barramento $C_B$	2,7 mF (650 V)
Banco de baterias	Capacidade de carga (C): 17 Ah Tensão nominal ( $v_{Bat-ELV}$ ): 192 V Corrente de carga: 5,2 A Corrente de descarga: 5,2 A
Indutor $L_{b1-LV}$	1,22 mH
Capacitor $C_{b-LV}$	10 $\mu$ F (250 V)
Indutor $L_{b2-LV}$	140 $\mu$ H
Emulador fotovoltaico	Corrente de curto-circuito (1000 W/m <sup>2</sup> ): 9,79 A Corrente de máxima potência (1000 W/m <sup>2</sup> ): 9,21 A Tensão de circuito aberto ( $v_{ca}$ ): 138,6 V Tensão de máxima potência: 114,3 V Potência máxima do arranjo: 1,05 kWp Resistência $r_{fv}$ : 0,06 $\Omega$
Indutor $L_{fv-LV}$	1,20 mH
Capacitor $C_{fv-LV}$	470 $\mu$ F (250 V)
Inversor de tensão	Potência nominal: 1 kW Tensão nominal ( $v_{ca}$ ): 127 V <sub>rms</sub> Corrente nominal: 7,87 A <sub>rms</sub> Taxa de distorção harmônica total: 4,5 %
Indutor $L_{i1}$	550 $\mu$ F
Capacitor $C_i$	470 nF (250 V)
Indutor $L_{i2}$	550 $\mu$ H
Carga de alta prioridade	300 W
Carga de média prioridade	200 W
Carga de baixa prioridade	100 W

## APÊNDICE B: ESPECIFICAÇÕES DA NANORREDE EM ELVDC

Tabela B – Especificações dos principais componentes da nanorede c.c. em ELVDC.

Componentes	Especificações
Capacitor do barramento $C_b$	10,00 mF (100 V)
Banco de baterias	Capacidade de carga (C) : 115 Ah Tensão nominal ( $v_{Bat-ELV}$ ) : 24 V Corrente de carga : 21 A Corrente de descarga : 21 A
Indutor $L_{b1-ELV}$	80 $\mu$ H
Capacitor $C_{b-ELV}$	100 $\mu$ F (100 V)
Indutor $L_{b2-ELV}$	4,2 $\mu$ H
Emulador fotovoltaico	Corrente de curto-circuito (1000 W/m <sup>2</sup> ) : 9,79 A Corrente de máxima potência (1000 W/m <sup>2</sup> ) : 9,21 A Tensão de circuito aberto ( $v_{ca}$ ) : 46,20 V Tensão de máxima potência : 38,10 V Potência máxima do arranjo : 350 Wp
Indutor $L_{fv-ELV}$	330 $\mu$ H
Capacitor $C_{fv-ELV}$	470 $\mu$ F (100 V)
Conversor <i>interlink</i>	500 W (380 V/ 48 V – 10,50 $A_{rms}$ )
Carga de alta prioridade	250 W
Carga de média prioridade	150 W
Carga de baixa prioridade	100 W